





TRAITÉ

DE L'ÉLECTRICITÉ

ET

DU MAGNÉTISME.

TOME II.

IMPRIMERIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,
IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, N° 24.

TRAITÉ

EXPÉRIMENTAL

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ET DU MAGNÉTISME,

ET DE LEURS RAPPORTS AVEC LES PHÉNOMÈNES NATURELS;

PAR M. BECQUEREL,

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE, ETC.

..............Si quid novisti rectius istis,
Candidus imperti : si non, his utere mecum.

TOME DEUXIÈME.



PARIS.

FIRMIN DIDOT FRÈRES, LIBRAIRES,

RUE JACOB, N° 24.

M DCCC XXXIV.

AVIS.

La Table des titres des principaux Mémoires qui ont été publiés sur l'Électricité et le Magnétisme, dans les journaux scientifiques allemands, paraîtra avec le troisième volume.

TRAITÉ EXPERIMENTAL

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ET

DU MAGNÉTISME.

LIVRE PREMIER.

DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

DU DÉGAGEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ.

§ Ier *Considérations générales sur le dégagement de l'électricité et sur quelques-unes de ses principales propriétés.*

1. Lorsqu'on frotte un tube de verre ou un bâton de gomme laque, dont la surface est bien sèche, avec un morceau d'étoffe de laine également bien sec, il acquiert la propriété d'attirer les barbes de plume ou autres corps légers qu'on lui présente; on dit alors qu'il est électrisé. Pour mieux étudier les effets de cette attraction, on présente les corps électrisés à une petite balle de moelle de sureau fixée à l'extrémité d'un fil de soie, dont l'autre est attachée à un point fixe (fig. 1). Cette petite balle est d'abord attirée, puis elle est repoussée aussitôt après le contact. On

en conclut 1° qu'un corps électrisé cède une portion de son électricité à celui qui le touche; 2° que deux corps qui possèdent chacun une électricité émanant de la même source, se repoussent. Mais il n'en est plus de même quand, ayant mis en contact la balle avec le tube de verre électrisé, on lui présente ensuite le bâton de gomme laque préalablement frotté; il y a alors attraction. Nous en tirons cette autre conséquence, qu'il y a attraction entre deux corps dont l'un possède l'électricité du verre, et l'autre l'électricité de la résine. On a appelé l'une électricité vitrée, parce qu'elle est produite ordinairement par le frottement sur le verre ou les corps dont la surface est vitreuse, et l'autre électricité résineuse, attendu qu'elle se développe sur les substances résineuses, ou celles dont la surface est terne. On a substitué à ces dénominations celles d'électricité positive et d'électricité négative, pour des motifs que nous ferons connaître plus tard.

Tous les phénomènes d'attraction et de répulsion se réduisent à ces deux lois : Deux corps chargés d'électricité de même nature se repoussent mutuellement, et s'attirent au contraire quand ils sont chargés d'électricité de nature différente.

2. Un bâton de gomme laque ayant été frotté avec une étoffe de laine, si l'on présente successivement au petit pendule, préalablement électrisé par communication, et le corps frotté et le frottoir, on voit que l'un et l'autre possèdent une électricité différente. Électriser un corps est donc opérer la séparation des deux électricités qui, par leur réunion, forment ce qu'on appelle l'électricité naturelle, ou le fluide neutre. Les deux électricités positive et négative, ainsi que l'électricité naturelle, ont reçu le nom de fluide en raison de quelques-unes de leurs propriétés qui ont de l'analogie avec celles des fluides, entre autres de pouvoir se coercer. Mais quelle est donc la nature de ce fluide, de cet agent qui disparaît aussitôt qu'il reprend sa position d'équilibre dans les corps? où le chercher?

Les corps sont composés de particules ou atomes qui sont séparés par des vides ou vascules que l'on suppose remplis d'une substance éthérée dont les oscillations, plus ou moins rapides, produisent les phénomènes de lumière et de chaleur; or, quand on frotte un corps pour l'électriser, on ébranle ses particules et on dérange leur état d'équilibre, et par conséquent celui de la substance éthérée qui les entoure. Est-ce donc aux modifications qu'acquiert alors cette dernière que l'on doit rapporter les phénomènes électriques, ou bien sont-ils dus à un autre fluide également impondérable qui existe dans les espaces intersticiels des molécules? Quoique la première supposition soit la plus probable, néanmoins les faits observés jusqu'ici ne sont pas encore suffisants pour résoudre cette question. Pour l'instant il est impossible d'en dire davantage.

§ II. *Du pouvoir conducteur des corps.*

3. Si l'on suspend la petite balle de sureau à un fil très-fin de métal, au lieu d'un fil de soie, et qu'on lui présente ensuite un corps électrisé, il y a de même attraction, mais cette attraction n'est pas suivie de répulsion après le contact; la balle de sureau agit, dans ce cas, comme un corps qui est constamment à l'état naturel. Il s'ensuit que la soie et le métal ne jouissent pas des mêmes propriétés. Cette différence dans le mode d'action a été observée pour la première fois, comme nous l'avons vu, par Grey, qui découvrit que les métaux donnent écoulement à l'électricité dans la terre, qu'on appelle le réservoir commun, tandis que la soie, la résine et le verre s'opposent à son passage; de là, la distinction des corps en conducteurs et non conducteurs. Ces derniers ont été appelés isolants, parce qu'on les emploie comme supports quand il s'agit de conserver à un corps conducteur l'électricité qu'on lui a donnée. La faculté isolante n'est que relative, car il n'existe aucun corps qui la possède complétement. On range parmi les corps mauvais conducteurs la peau de chat, le verre, le bois, le papier, la

soie, la gomme laque, les huiles, etc.; et parmi les corps conducteurs les métaux, le charbon bien préparé, l'eau, etc. Nous nous bornons dans ce moment à indiquer ces deux classes, sans faire connaître les rapports de conductibilité entre les différents corps qui les composent.

Il est évident que l'air atmosphérique doit être rangé parmi les corps mauvais conducteurs, car, s'il livrait passage à l'électricité, il serait impossible de conserver sur la surface des corps l'électricité qu'on leur communique.

La faculté conductrice de l'eau s'oppose à ce que la plupart des corps non conducteurs, dont la surface est recouverte d'une couche d'eau hygrométrique, puissent s'électriser par frottement tant que cette couche existe; aussi est-on forcé de la leur enlever quand on veut les rendre électriques. C'est pour ce motif que les expériences sur l'électricité libre ne réussissent bien que dans les temps froids et secs. Toutes les tentatives qu'on a faites jusqu'ici pour déterminer les relations qui existent entre les corps conducteurs et les corps non conducteurs ont été infructueuses; on sait seulement que la faculté plus ou moins conductrice dépend en partie de l'arrangement des molécules, car tous les éléments des corps, comme nous aurons occasion de le voir dans le cours de cet ouvrage, sont doués de la propriété d'obéir à l'action des forces électriques quand ils font partie d'une dissolution.

4. Nous avons dit que l'air sec n'était point conducteur; cette propriété appartient également aux gaz qui n'agissent, ainsi que lui, que par leur pression pour maintenir l'électricité à la surface des corps. On s'assure de ce fait, en plaçant un corps conducteur electrisé et isolé sous le récipient d'une machine pneumatique, dans lequel on fait le vide; ce corps perd peu à peu son électricité à mesure que l'on diminue la pression de l'air. Si, au lieu de soumettre à l'expérience un corps conducteur, on emploie un morceau de verre ou un bâton de gomme laque préalablement frotté, il y a également perte d'électricité, mais elle ne s'effectue pas dans un

temps aussi court; les particules des corps non conducteurs retiennent donc avec une certaine force l'électricité qu'elles possèdent. Nous avons vu que lorsqu'une petite balle de sureau a touché un corps électrisé, elle lui enlève une portion de son électricité; il s'ensuit que le fluide électrique peut être distribué sur différents corps ou coercé sur une surface. En touchant un corps électrisé avec un corps conducteur non isolé, qui communique par conséquent avec la terre, on atténue tellement la quantité d'électricité qu'il possède, que celle-ci n'est plus sensible.

Les molécules de chaque fluide répandu sur la surface d'un corps s'écartent les unes des autres en vertu de leur action propre; la résultante de ces actions est appelée tension électrique, et est proportionnelle à la densité du fluide ou au nombre de molécules renfermées dans un espace donné. De plus la force totale de l'attraction ou de la répulsion entre deux corps varie, pour chaque distance, dans le même rapport que les quantités d'électricités propres à chacun d'eux, il s'ensuit que leur réaction est proportionnelle au produit de ces deux quantités. Je me borne à énoncer cette loi que je démontrerai plus tard.

Les attractions et répulsions électriques ont lieu non-seulement à travers l'air, mais encore à travers la gomme laque, le verre et autres corps mauvais conducteurs, comme Newton l'a observé.

On peut encore reconnaître la présence de l'électricité dans les corps, autrement que par des attractions et répulsions. Quand les deux fluides se recombinent pour former du fluide neutre, il résulte de cette action un courant électrique qui paraît réagir d'une manière révolutive sur l'aiguille aimantée.

5. Si nous suivions la marche qui est généralement adoptée dans les traités de physique, nous exposerions les lois suivant lesquelles s'exercent les actions électriques à distance, celles de la distribution du fluide électrique libre sur la surface des corps, ainsi que d'autres propriétés générales de l'électricité; puis nous arriverions aux

différents procédés à l'aide desquels on parvient à exciter la puissance électrique dans les corps. Mais comme cette dernière question, qui est fondamentale pour la théorie générale de l'électricité, exige, pour être traitée complétement, l'emploi d'appareils dont la construction repose non-seulement sur certaines propriétés de l'électricité en repos, mais encore sur d'autres qui sont relatives à l'électricité en mouvement, nous serions donc obligés de renvoyer à la fin de la première partie de cet ouvrage la plupart des phénomènes qui ont rapport au dégagement de l'électricité, ce qui serait un inconvénient. Il nous paraît plus rationnel, avant d'exposer les propriétés générales de cet agent, de faire connaître toutes les causes qui le mettent en action. Aussi préférons-nous suivre cette marche.

Si toutes les propriétés du fluide électrique n'avaient pas déja été mentionnées dans la Notice historique, nous n'en n'agirions pas ainsi, puisque nous emploierions des appareils dont nous ne connaîtrions pas la construction. Au surplus, s'il y a un inconvénient à en agir ainsi, on en est dédommagé amplement par les avantages que l'on trouve à exposer de suite toutes les causes qui troublent dans les corps l'équilibre naturel de l'électricité.

CHAPITRE II.

DES APPAREILS A L'AIDE DESQUELS ON RECONNAIT LA PRÉSENCE DE L'ÉLECTRICITÉ QUAND ELLE EST EN REPOS OU EN MOUVEMENT.

§ I. *Des Électroscopes et des Électromètres.*

6. On a imaginé différents appareils pour reconnaître quand un corps possède une quantité plus ou moins forte d'électricité libre. Si cette quantité est considérable, l'expérience est facile, comme nous l'avons vu, mais il n'en est pas de même si elle est faible. Dans le premier cas, il suffit de lui présenter des corps légers, tels que de la poussière, des barbes de plume ou mieux encore une petite balle de moelle de sureau, suspendue à l'extrémité d'un fil simple de cocon; s'il y a attraction, puis répulsion, on peut être assuré que le corps est électrisé. Dans le second, il faut avoir recours à des appareils particuliers, auxquels on a donné le nom d'électroscopes. Ceux dont on fait usage le plus ordinairement sont formés 1° de deux brins de paille suspendus parallèlement l'un à l'autre, le plus près possible, à deux petits anneaux mobiles de fil de métal, fixés à une tige métallique terminée par un bouton arrondi (fig. 2); 2° de deux fils de métal très-fins, terminés par deux petites balles de sureau, et suspendus comme les deux brins de paille; 3° de deux lames d'or battu très-minces, suspendues parallèlement l'une à l'autre, coïncidant dans toutes leurs parties, et dont une de leurs extrémités est fixée dans une pince qui communique également à la tige métallique (fig. 3).

Dès l'instant que cette tige reçoit une petite quantité

d'électricité, celle-ci est transmise aux pailles, aux fils de métal ou aux feuilles d'or, qui s'écartent aussitôt, en vertu de la répulsion qui a toujours lieu entre deux corps chargés d'électricité contraire. Cette répulsion est d'autant plus forte, pour la même quantité d'électricité perçue, que les pailles sont plus légères; aussi doit-on s'appliquer, dans la construction des électroscopes, à diminuer leur poids sans changer les surfaces. Si l'on veut leur donner le plus grand degré possible de sensibilité, il est nécessaire encore que la tige et le bouton occupent le plus petit volume possible par rapport à celui des brins de paille ou des feuilles d'or battu. Pour éviter les mouvements de l'air et le choc des corps environnants, on place l'appareil sous une cloche, dont on recouvre le haut intérieurement et extérieurement de plusieurs couches de vernis à la gomme laque, appliquées à chaud, afin de préserver le verre de l'action hygrométrique de l'air. La cloche doit avoir un diamètre suffisant pour que les brins de paille, les balles de sureau, ou les feuilles d'or ne viennent pas décharger l'électricité qu'on leur a communiquée sur les parois du verre, qui resteraient alors électrisées. On évite cet inconvénient en plaçant, comme l'indique la figure 3, deux petites boules métalliques *b b'* communiquant au sol au moyen de tiges métalliques, et contre lesquelles les petits pendules viennent frapper dans leur plus grand écartement. On peut, si l'on veut, appliquer sur les parois de la cloche deux lames d'étain.

La tige qui porte le bouton de métal est suffisamment mobile, pour qu'en la tournant convenablement, on puisse mesurer l'amplitude de l'écartement sur une échelle circulaire appliquée à la paroi intérieure de la cloche. Les amplitudes observées ne servent qu'à comparer les quantités d'électricité successivement mises en expérience, attendu que l'action de la pesanteur tendant à ramener les pendules dans la direction verticale, et augmentant à mesure que ceux-ci s'écartent de cette direction, la

force répulsive n'est pas proportionnelle à l'écartement qu'elle produit, mais suit une autre loi plus composée dont nous n'avons pas à nous occuper. Ces appareils ne doivent donc être employés que lorsque l'on cherche seulement des rapports entre les quantités d'électricité qu'on leur communique.

On se sert quelquefois d'un autre appareil, qui est formé d'un petit fil de laiton terminé par deux petites boules creuses, et au milieu duquel est placée une chape en acier ou en agate, que l'on pose sur un pivot terminé en pointes (fig. 4). Cet électroscope est d'autant plus sensible, que le frottement de la chape sur le pivot est moindre.

7. Coulomb en a imaginé un autre (fig. 5) dont la sensibilité est excessive et qui a l'avantage sur les précédents de donner, au besoin, des indications comparables. Cet électroscope est très-simple; il se compose d'un fil de cocon dédoublé dont l'un des bouts est fixé dans les branches d'une pince, et dont l'autre porte un petit fil horizontal de gomme laque, à l'une des extrémités duquel est attaché un disque de clinquant. Pour maintenir l'horizontalité, on établit à l'autre extrémité un petit contrepoids ou bien on place le point de suspension de manière à établir immédiatement l'équilibre. La pince est fixée dans une pièce mobile *a a* que l'on tourne quand on veut placer l'aiguille de gomme laque dans une position déterminée. La tige mobile est fixée au centre d'un couvercle de verre qui recouvre une cloche également de verre, et dans lequel on a pratiqué une échancrure pour introduire les corps soumis à l'expérience. L'intérieur de la cage est desséchée avec de la chaux vive ou du chlorure de calcium, que l'on place au fond dans une capsule. Si l'on veut comparer ensemble les quantités d'électricité communiquées au disque de clinquant, il faut ajouter à cet appareil plusieurs accessoires qui le transforment en une balance électrique (fig. 6).

On commence par remplacer le fil de cocon par un fil d'argent d'un très-petit diamètre, et non recuit, afin

de lui laisser toute son élasticité. Ce fil devant avoir une certaine longueur, on l'enferme dans un cylindre de verre creux, au haut duquel est placé un tambour divisé qui tourne avec frottement autour du cylindre, et au centre duquel s'ajuste d'une manière mobile la tige ou pince qui sert à retenir le fil. Un index est soudé à la partie fixe de la douille autour de laquelle se meut le tambour, comme l'indique la fig. 7. Veut-on tordre le fil d'un certain nombre de degrés, on tourne convenablement le tambour, après avoir mis préalablement le zéro de l'échelle vis-à-vis de l'index. La pince pouvant tourner aussi indépendamment du tambour, on place où l'on veut le disque de clinquant. Pour mesurer les écarts de l'aiguille de gomme laque, quand on lui présente un corps électrisé disposé comme l'indique la figure, on place à la même hauteur, sur la cage, une échelle divisée en degrés; mais comme les cloches cylindriques ne sont jamais bien calibrées, on leur substitue des cages carrées. Telle est la construction de la balance électrique ou de torsion, dite de Coulomb. Plus les forces que l'on veut comparer sont petites, plus il faut donner de sensibilité à l'appareil et plus aussi il faut employer des fils longs et fins, attendu que, suivant les expériences de Coulomb, la force de torsion est en raison inverse des longueurs des fils et proportionnelle aux quatrièmes puissances de leurs épaissseurs. Les fils longs ont aussi l'avantage de pouvoir se tordre d'un grand nombre de degrés sans perdre sensiblement leur élasticité. Pour s'assurer si les fils n'ont pas perdu de leur élasticité après plusieurs expériences, il faut que l'aiguille de gomme laque revienne exactement dans sa position primitive quand l'aiguille du micromètre est ramenée à zéro. Nous verrons plus loin l'usage de cette balance, qui repose sur ce principe, que la réaction de torsion est exactement proportionnelle à l'angle de torsion. Coulomb dans l'emploi qu'il en a fait compare les forces électriques aux forces de torsion, qui sont toujours proportionnelles aux angles de torsion.

8. Tous ces électroscopes, sans en excepter celui de Coulomb, sont insuffisants quand il s'agit de rendre sensible une électricité dont la tension est excessivement petite et qui émane d'une source fonctionnant continuellement. Il est nécessaire préalablement de l'accumuler en quantité suffisante pour que son effet soit sensible. On ajoute alors à l'électroscope deux plateaux en laiton, appelés condensateurs, qui sont dressés avec soin au tour, pour que les deux surfaces que l'on met en contact coïncident aussi parfaitement que possible. Ces surfaces sont recouvertes de plusieurs couches de vernis à la gomme laque appliquées à chaud; l'un des plateaux est vissé à la tige de métal à la place du bouton fig. 8, et le plateau supérieur porte à son centre un manche isolant par lequel on le prend. Le premier est appelé collecteur, parce qu'il est destiné à recevoir l'électricité de la source d'où elle émane. On est dans l'usage de recouvrir aussi de vernis les autres parties du plateau, excepté celles qui servent à établir la communication avec la source d'électricité et le réservoir commun. Les plateaux en laiton ne doivent pas être employés dans les expériences délicates, parce qu'il est impossible de se garantir des effets électro-chimiques; il faut leur substituer des plateaux de cuivre plaqués en or, ou bien des plateaux en verre doré : on est alors assuré que la réaction des liquides sur le métal ne peut troubler les effets que l'on veut observer. Quelquefois on enveloppe la cloche d'une autre, pour empêcher qu'elle ne se recouvre d'une couche d'eau hygrométrique; mais ce qu'il y a de mieux à faire est de placer l'électroscope condensateur dans une cage vitrée, dont l'étendue soit suffisante pour que l'on puisse expérimenter sans difficulté; en y plaçant de la chaux vive, on évite que l'air humide n'enlève l'électricité à la source qui la produit, avantage que l'on n'a pas quand on se borne à environner la cloche de l'électroscope d'une cage carrée reposant sur la même base.

Le diamètre des plateaux varie depuis 4 pouces jusqu'à 8 ou 10; on peut leur donner de plus grandes

dimensions, mais on éprouve alors de la difficulté à les dresser de manière à ce que les surfaces de contact coïncident parfaitement : il faut alors leur donner une grande épaisseur pour empêcher qu'elles ne deviennent gauches, ce qui rend les plateaux trop pesants. J'ai formé des plateaux avec deux glaces de 20 pouces de diamètre, qui avaient été usées à l'émeri l'une sur l'autre pour mieux coïncider, puis recouvertes avec soin de feuilles d'étain très-minces. La manœuvre en était également fatigante, je la rendis plus facile au moyen d'une corde passant dans une double poulie, et d'un contre-poids. Cet appareil avait une force condensante considérable; mais comme le métal enveloppant était très-oxidable, j'obtenais des effets composés qu'il n'était pas toujours possible d'analyser. En substituant des feuilles de platine à celles d'étain, on aurait fait disparaître cet inconvénient.

On visse aussi au plateau inférieur du condensateur une tige horizontale en laiton, terminée par un anneau circulaire sur lequel on pose les capsules de métal ou autres petits appareils qui servent à diverses expériences.

9. L'électroscope condensateur a reçu dans ces derniers temps un grand perfectionnement qui est dû à M. Bohnenberger, professeur de physique et d'astronomie à Tubingues (1). On prend deux piles sèches que l'on place dans une position verticale, les pôles contraires en regard, comme l'indique la figure 9; au lieu de deux feuilles d'or, on n'en prend qu'une seule, qui est placée entre les deux pôles. Aussitôt qu'elle a reçu du condensateur une très-faible quantité d'électricité, elle est attirée par le pôle qui possède l'électricité contraire, et repoussée par l'autre, deux actions qui s'ajoutent. Cet appareil a une telle sensibilité, que, dans un temps sec, lorsque les piles sèches fonctionnent convenablement, un bâton de gomme laque frotté avec du drap agit sur

(1) Bibl. univ. Nov. 1820 et Annal. de Ch. et de Phys., t. XVI.

la feuille d'or à une distance de 2 ou 3 mètres. L'état électrique de la main ou des cheveux exerce aussi une influence jusqu'à une certaine distance; aussi est-on obligé de s'en garantir pour ne pas être induit en erreur.

On a reproché à cet appareil de donner des indications irrégulières, en raison de son extrême sensibilité. Cela est vrai quand on opère avec des plateaux de cuivre, parce qu'il y a alors une réaction sur ce métal de la part des liquides qui adhèrent aux doigts, laquelle produit un dégagement d'électricité qui peut troubler les résultats; mais, quand les plateaux sont d'or ou de cuivre doré, on n'a pas à craindre de semblables effets.

La sensibilité d'un électroscope condensateur dépend en grande partie de l'isolement du plateau inférieur par rapport à la cloche de verre, qui donne toujours plus ou moins écoulement à l'électricité, en raison de la couche d'eau hygrométrique qui se dépose sur sa surface; pour obvier à cet inconvénient, on a adopté un mode d'isolement qui permet d'opérer, même lorsque la cloche est humide. Voici en quoi il consiste (fig. 10). TT est un tube de verre recouvert intérieurement et extérieurement de plusieurs couches de vernis à la gomme laque, et dans lequel passe la tige du condensateur, laquelle est assujétie sur la paroi intérieure, au moyen d'un bouchon de gomme laque *bb*, appliquée dessus à chaud. A la partie supérieure de la tige on visse une petite cloche en métal, qui recouvre, le plus près possible sans la toucher, la surface du tube; il résulte de là que l'air, quand bien même il serait humide, ne circulant que très-lentement entre le tube et la cloche, ne dépose que difficilement dans l'intérieur la vapeur d'eau dont il est chargé, de sorte que l'isolement dure pendant assez long-temps.

Pour se servir de l'électroscope condensateur, il suffit de mettre en communication le plateau inférieur du condensateur avec la source qui fournit l'électricité, et de toucher le plateau supérieur avec le doigt mouillé.

L'électricité qui arrive ne pouvant traverser la couche de vernis, décompose l'électricité naturelle du plateau supérieur, attire celle de nom contraire, et repousse l'autre. Ces actions continuent jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre les forces attractives et répulsives. Si l'on enlève alors le plateau supérieur, on rend libre sur le plateau inférieur l'électricité qui y était dissimulée, et son action se manifeste aussitôt sur l'électroscope.

Quand la main de l'expérimentateur est naturellement sèche, il ne doit pas se borner à mouiller le bout du doigt, il faut encore qu'il se la lave avec de l'eau distillée, car je me suis aperçu bien des fois que l'absence de résultats dans l'appareil provenait de ce que la peau de ma main, qui était très-sèche, ne donnait pas écoulement à l'électricité.

L'expérimentateur doit encore tenir compte des effets électriques qui peuvent avoir lieu dans la réaction de l'eau dont il imprègne ses doigts sur les liquides qui suintent par les pores de la peau; car, dans quelques circonstances, il y a une réaction chimique qui donne lieu à des effets électriques appréciables.

10. On a imaginé d'autres instruments auxquels on a donné le nom d'électromètres, pour juger approximativement de la charge d'une machine ou d'une batterie électrique.

Le premier est l'électromètre de Henley, ou à cadran, dont on se sert toutes les fois qu'il s'agit d'estimer des charges considérables (fig. 11); il consiste en une tige arrondie d'une matière conductrice, longue d'environ 7 pouces et terminée par une boule; immédiatement au-dessous est fixé un demi-cercle d'ivoire, dont le centre porte un axe autour duquel se meut librement une aiguille légère, de 4 pouces environ de long, et portant à son extrémité inférieure une petite balle de sureau. Cette aiguille peut parcourir avec une grande facilité une demi-circonférence, divisée pour que l'on puisse estimer les écarts. Dans les cas ordinaires, l'aiguille est dans la direction de la verticale, mais dès l'instant que l'appareil

est électrisé, la balle s'écarte de la tige et l'index s'en éloigne plus ou moins, en raison de la tension de l'électricité.

L'électromètre de Lane est construit sur un principe différent du précédent. Il consiste en deux boules d'égale dimension, dont l'une communique avec l'intérieur d'une bouteille électrique, et la seconde est isolée et opposée à la première, comme l'indique la fig. 12. Ces deux boules peuvent être mises en contact, ou placées à une distance déterminée. De plus, la boule isolée est en communication avec la surface extérieure au moyen d'un fil de métal. Quand on veut juger de la force de la charge, on approche plus ou moins les deux boules pour savoir à quelle distance s'opère la décharge : on doit, avant de s'en servir, nettoyer parfaitement ces boules, attendu que les corpuscules qui adhèrent aux surfaces facilitent la décharge en diminuant la distance.

§ II. *Des Multiplicateurs électriques.*

11. Lorsque l'on veut constater la présence de faibles courants électriques, on emploie des appareils auxquels on a donné le nom de galvanomètres ou de multiplicateurs. Nous allons faire connaître ceux qui jusqu'ici ont été regardés comme les plus sensibles. Leur construction repose sur la propriété dont jouit le fluide électrique, quand il parcourt un fil de métal, de réagir sur une aiguille aimantée, librement suspendue, de telle manière que si le fil, se trouvant dans le plan du méridien magnétique, est placé au-dessus ou au-dessous de l'aiguille, celle-ci est déviée à droite ou à gauche, dans une direction perpendiculaire au fil, suivant le sens du courant. Si donc on plie le fil, de manière à le faire revenir au-dessus de l'aiguille, elle éprouve de chacune des circonvolutions une action qui tend à la diriger dans le même sens, de sorte que l'impulsion reçue est double de celle qui aurait été produite par le fil rectiligne. En continuant ainsi à

replier le fil sur lui-même, on multiplie l'action du courant sur l'aiguille. De là le nom de multiplicateur électrique donné à cet appareil. Le fil, qui est entouré de soie pour éviter la communication directe d'une circonvolution à l'autre, est enroulé autour d'un châssis en bois dans l'intérieur duquel est suspendue une aiguille aimantée. La construction de cet appareil varie suivant la source qui produit les courants que l'on veut observer; tantôt le multiplicateur est à fil très-long et à petit diamètre, tantôt il est à fil court et d'un diamètre d'un millimètre à un demi-millimètre. Pour les distinguer, nous les appellerons, l'un, multiplicateur électro-chimique ou à long fil, l'autre, multiplicateur thermo-électrique ou à fil court. Quand l'aiguille aimantée est dérangée de sa position d'équilibre par l'action d'un courant, elle tend à y revenir par suite de l'action de la terre. Pour neutraliser cette action, on présente à l'un des pôles de l'aiguille, à une certaine distance, le pôle opposé d'un barreau aimanté, ou bien on place au-dessous de l'aiguille une autre aiguille, les pôles inverses en regard; mais aucun de ces moyens ne remplit aussi complétement le but qu'on se propose que deux aiguilles aimantées, aussi identiques que possible, sous le rapport de la nature de l'acier, de leur construction et de leur aimantation, et que l'on fixe dans une direction parallèle, les pôles inverses en regard, aux deux extrémités d'une paille ou d'une autre tige légère. l'une des aiguilles est placée dans l'intérieur du châssis et l'autre en dehors. Ce système étant suspendu à un fil de cocon par un des bouts de la tige, n'obéit que faiblement à l'action du magnétisme terrestre, qui n'exercerait dessus aucune influence, si l'identité des deux aiguilles était parfaite; mais comme cette condition ne peut être remplie, il ne lui reste plus qu'une force directrice très-faible. Cette disposition est due à M. Nobili.

Je vais donner ici la description complète de deux galvanomètres très-sensibles, l'un à fil long et l'autre à fil court.

MULTIPLICATEUR A FIL LONG.

Dimensions du châssis.
Fig. 13. Plan, largeur $ab = 27$ millim.; longueur $bc = 40$ millim.; ouverture $oo = 5$ millim.
Fig. 14. Coupe suivant mn; $55 = 10$ millim.
Fig. 15. Élévation; $ll = 4$ millim.

Fil de cuivre recouvert de soie. Le fil a moins d'un sixième de millimètre de diamètre et forme huit cents tours autour du châssis.

Les aiguilles aimantées (fig. 16.) Ce sont deux aiguilles ordinaires à coudre, de 36 millim. de longueur, et aimantées à saturation. Elles sont placées parallèlement l'une à l'autre, à une distance de 15 millim., à chacune des extrémités de deux fils de cuivre, tortillés l'un sur l'autre, afin de pouvoir les déranger au besoin. On prend pour fil de suspension un fil de cocon dédoublé, dont la longueur est d'un décimètre.

Quelques précautions que l'on prenne pour que le système soit astatique, il lui reste néanmoins une force directrice appréciable, qui n'empêche pas que l'appareil ne possède un grand degré de sensibilité. Si la force directrice est trop grande, on la diminue au moyen d'un procédé qui est dû à M. Nobili : on cherche celui des quatre pôles des 2 aiguilles qui a la plus forte quantité de magnétisme; alors on lui en enlève une partie en le frottant légèrement avec le pôle opposé d'un barreau faiblement aimanté, et l'on continue jusqu'à ce que le système sorte du méridien magnétique pour s'approcher plus ou moins de la position perpendiculaire. On fait osciller ensuite le système, et l'on juge, d'après le nombre d'oscillations, dans un temps donné, si l'action du magnétisme terrestre est diminuée suffisamment. Règle générale : il ne faut laisser au système juste que la force directrice qui lui est nécessaire pour le maintenir dans une position fixe, afin qu'il puisse l'abandonner en vertu de l'action du courant le plus faible. Toute la sensibilité de

l'appareil est là; aussi l'expérimentateur doit-il faire tous ses efforts pour atteindre ce but. Le châssis doit être placé sur un support mobile, qui permette de lui donner toutes les positions possibles par rapport à l'aiguille. On atteint ce but en le fixant sur un cylindre de laiton *cc*, qui tourne autour de son axe, au moyen d'un engrenage à pignon qui est représenté dans la figure 17. En tournant le bouton *bb*, on fait prendre au galvanomètre toutes les positions voulues; le tout est ajusté sur une petite table. Le fil de cocon est suspendu à une tige en potence *tt*. Le galvanomètre et les parties accessoires sont recouverts d'une cloche de verre pour préserver l'aiguille des mouvements de l'air.

MULTIPLICATEUR THERMO-ÉLECTRIQUE, OU A FIL COURT.

Dimensions du châssis.
Fig. 13. Plan, largeur *ab* = 50 millim.; longueur *bc* = 50 millim.; ouverture *oo* = 8 millim.
Fig. 14. Coupe suivant *mn*; 55 = 16 millim.
Fig. 15. Élévation, *ll* = 4 millim.

Fil de cuivre recouvert de soie, 2/3 de millimètre de diamètre; il forme trente tours autour du galvanomètre.

Aiguilles aimantées. Elles ont 46 millimètres de long, et sont placées comme dans le multiplicateur électro-chimique.

12. Au lieu de deux aiguilles, on peut en mettre quatre, que l'on place de même parallèlement les unes aux autres; les deux aiguilles du milieu ont leurs pôles de même nom dirigés dans le même sens, et les deux aiguilles extrêmes, quoique ayant aussi leurs pôles de même nom dans le même sens, sont dirigées dans un sens différent par rapport aux aiguilles du milieu.

Le châssis doit être percé en o′o′, fig. 14, pour laisser passer la quatrième aiguille. Les deux aiguilles du milieu sont placées dans l'intérieur, et les deux aiguilles extrêmes, l'une en dedans, l'autre en dehors. Je me suis servi avec avantage de cet appareil, dont la con-

struction demande plus de soin que celui à deux aiguilles.

On doit toujours avoir en outre à sa disposition deux galvanomètres, chacun à deux fils, égaux et enroulés de la même manière, l'un pour les effets électro-chimiques, l'autre pour les effets thermo-électriques. Ils servent aussi à comparer deux courants de même nature, mais de source différente.

Les multiplicateurs dont nous avons donné la description servent à reconnaître les courants très-faibles produits par l'électricité qui émane de sources fonctionnant sans interruption; mais ils ne peuvent être d'aucune utilité quand on veut constater l'existence d'un courant produit par la décharge d'une bouteille de Leyde. Il faut isoler davantage les circonvolutions du fil. M. Colladon (1) a obtenu ce résultat en préparant un galvanomètre de 500 tours, dont le fil était doublement recouvert de soie, et chaque série de tours séparée par un taffetas gommé. Cette double précaution est indispensable pour isoler davantage les unes des autres les diverses parties du fil; car sans cela l'électricité passe d'une circonvolution à une autre.

M. Person a imaginé un autre multiplicateur, fondé sur le principe qu'une aiguille d'acier, placée suivant l'axe d'une spirale électro-magnétique, devient magnétique lorsqu'on fait passer dans le fil la décharge d'une bouteille de Leyde faiblement chargée. Il prend à cet effet une aiguille d'acier très-mince, peu trempée et ne possédant qu'une polarité magnétique excessivement faible, pour qu'elle puisse la perdre et en prendre une autre sans difficulté; il la suspend à un fil simple de soie, dans l'intérieur du châssis du multiplicateur, placé de manière que les circonvolutions du fil se trouvent perpendiculaires à la direction de l'aiguille, au lieu d'être parallèles comme dans les multiplicateurs ordinaires. Quand on fait passer la décharge électrique dans le fil,

---

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XXXIII, p. 62.

l'aiguille, suivant le sens de la décharge, prend une plus forte polarité, ou bien perd la sienne pour en reprendre une autre en sens inverse. Dans le premier cas, elle reste immobile; dans le second, elle pirouette et décrit une demi-circonférence de cercle, afin de prendre une position d'équilibre compatible avec le changement de ses pôles. Il faut donc opérer de manière à faire passer la décharge dans un sens tel que la polarité de la petite aiguille soit changée.

Cet appareil, convenablement disposé, peut être employé avec avantage toutes les fois que l'on veut reconnaître les courants produits par de faibles décharges électriques.

§ III. *De la mesure des courants électriques.*

13. Les multiplicateurs précédents n'accusent que des différences entre les intensités des courants qui produisent telle ou telle déviation de l'aiguille aimantée, puisque la loi qui exprime les rapports entre ces intensités et les déviations correspondantes, et qui est très-compliquée, varie d'un appareil à l'autre; on a donc été forcé d'avoir recours à des méthodes particulières pour les graduer. La méthode la plus simple consiste à employer un multiplicateur à plusieurs fils. On conçoit que si l'on enroule, en même temps, autour d'un châssis, deux fils de même métal, de même longueur et de même diamètre, et également recouverts de soie, l'aiguille aimantée ne sera pas dérangée de sa position d'équilibre, quand on fera passer dans chaque fil un courant d'égale intensité, émanant d'une source semblable, mais dirigé en sens contraire l'un de l'autre. Maintenant, si l'on fait passer dans chaque fil un courant d'égale intensité, dirigé cette fois dans le même sens, la déviation de l'aiguille aimantée correspondra à une force double de celle qu'on aurait eue si l'on n'eût employé qu'un seul courant. En faisant varier l'intensité du courant qui passe dans chaque fil, on aura une série d'observa-

tions qui permettront de former une table des intensités électriques.

Or, rien n'est plus facile que de se procurer des courants égaux; il suffit de souder à chacun des bouts d'un même fil une des extrémités d'un fil de fer, de manière à former deux circuits fermés, puis de courber chacun d'eux à chaque soudure, semblablement placée, pour que l'on puisse passer la partie recourbée dans un tube de verre, fermé à l'un de ses bouts et plongeant dans un bain de mercure, dont on élève successivement la température au moyen d'une lampe à alcool placée au-dessous. La figure 18 indique le dispositif de l'expérience. Si l'on soumet successivement à l'expérience une soudure, puis deux soudures, et que l'on note dans chaque cas, pour la même température, la déviation de l'aiguille aimantée, on aura des angles qui correspondront à des forces simple et double. Pour avoir des résultats comparables, il faut, 1° que la soudure, dont on n'élève pas la température, plonge dans de la glace fondante; 2° que l'épaisseur du tube dans lequel on passe une partie du circuit où se trouve la soudure, soit sensiblement la même que celle du thermomètre qui plonge dans le mercure, afin que le mercure et le métal reçoivent dans le même temps les effets de la chaleur. On préfère le bain de mercure au bain d'huile, à cause de la grande différence de conductibilité pour la chaleur entre l'huile et les métaux, différence qui occasionne des retards dans la production simultanée des phénomènes. Il est nécessaire aussi que, dans la portion recourbée du circuit, les fils métalliques ne se touchent seulement qu'aux soudures. On évite cet inconvénient en recouvrant de soie les fils, excepté dans les points voisins de la soudure; enfin il faut prendre toutes les précautions possibles pour que le thermomètre et les points de jonction que l'on échauffe atteignent exactement la même température au moment où l'on observe.

On remplit cette condition en élevant la température d'une soudure sensiblement au point où l'on veut expérimenter, et éteignant brusquement la lampe; la température continue à monter pendant quelques secondes, puis elle redescend et reste un instant stationnaire. On s'arrange pour que cette température soit précisément celle dont on a besoin; on est assuré alors que le thermomètre et les soudures ont la même température. Pour bien faire comprendre la méthode, je vais donner les résultats que j'ai obtenus avec un multiplicateur à quatre fils; bien entendu que ces résultats ne peuvent servir que pour cet appareil, puisqu'ils changent quand on modifie sa construction.

TABLEAU N° 1.

TEMPÉRATURE.	DÉVIATIONS OBTENUES avec 1 fil.	DÉVIATIONS OBTENUES avec 2 fils.	DÉVIATIONS OBTENUES avec 3 fils.	DÉVIATIONS OBTENUES avec 4 fils.
10°	1°,30	2°,60	3°,90	5°,20
20	2,60	5,30	7,80	10,10
30	4,00	7,65	10,55	13,25
40	5.40	10,	13,35	16,50
50	6,65	11,75	15.40	19,40
60	7,90	13,50	17,50	21,50
80	10,30	16.50	21,00	25,00
90	11,10	17,65	22,35	26,00
100	11,90	18,80	23,75	28,
110	12,55	19,90	25,60	29,17
120	13,20	21,00	26,50	30,35
130	14.00	22,	27,30	31,17
140	14.75	23,	28,	32,00
160	15,50	24,	29,40	33,25
200	16,90	25,	30,	35,25
300	17,80	26,50	31,10	»

Supposons maintenant que la déviation 1°,30 soit produite par une force électro-dynamique égale à 2, la déviation 2°,60 le sera par une force égale à 4, puisqu'il y a addition de deux courants; la déviation 3°,90, par une force égale à 6, etc. En continuant le même raison-

nement, plaçant à côté de chaque déviation le nombre qui lui correspond, et admettant que, pour la même température, deux courants égaux produisent une force double, trois courants une force triple, on formera un nouveau tableau dans lequel on aura, d'un côté, les déviations de l'aiguille aimantée, et de l'autre, les intensités correspondantes de la force électro-dynamique.

Tableau N° 2.

Température.	1 fil.		2 fils.		3 fils.		4 fils.	
	Déviations	Intens. élec.	Déviations	Intens. élec.	Déviations	Intens. élec.	Déviations	Inten. élec.
5°	0°,65	1°	1°,30	2°	1°,95	3°	2°,60	4°
10	1,30	2	2,60	4	3,90	6	5,20	8
15	1,95	3	3,95	6	5,85	9	7,60	12
20	2,60	4	5,30	8	7,80	12	10,10	16
30	4,00	6	7,65	12	10,55	18	13,25	24
40	5,40	8	10,00	16	13,35	24	16,50	32
50	6,85	10	11,75	20	15,40	30	19,00	40
60	7,90	12	13,50	24	17,50	36	21,50	48
70	9,00	14	15,00	28	19,25	42	23,25	56
80	10,30	16	16,50	32	21,00	48	25,00	64
90	10,90	18	17,65	36	22,50	54	26,00	72
100	11,90	20	18,80	40	24,00	60	28,00	80
110	12,55	22	20,00	44	25,30	66	29,15	88
120	13,10	24	21,20	48	26,50	72	30,10	96
130	14,00	26	22,10	52	27,30	78	31,17	104
140	14,75	28	23,00	56	28,30	84	32,00	11»
150	» »	»	» »	»	» »	»	» »	»
160	15,50	30	24	60	29,40	90	33,25	120
180	» »	»	».0	»	» »	»	» »	»
200	16,90	32	25	64	30,00	96	35,15	128
250	» »	»	»	»	» »	»		
300	17,80	36	26,50	72	31,21	108		

Dans ce tableau, les déviations de l'aiguille aimantée sont accompagnées des fractions décimales; mais rien n'est plus simple que de trouver les intensités du courant correspondantes à des déviations en nombres entiers : il suffit de prendre des moyennes entre les résultats les plus rapprochés.

Au lieu d'un multiplicateur à plusieurs fils, on peut arriver au même but avec le multiplicateur ordinaire. On prend un fil composé de fils alternatifs de fer et de cuivre, soudés bout à bout, et dont les extrémités sont

mises en communication avec le multiplicateur; on élève ensuite la température de l'une des soudures à 10°, par exemple, et maintenant les autres à zéro; on note la déviation; puis on chauffe au même degré la 3ᵉ, la 5ᵉ soudure, etc. : on a alors des déviations qui correspondent à des courants doubles, triples en intensité. En variant la température, on finit par recueillir assez d'observations pour former une table des intensités. En voici une qui a été formée d'après cette méthode:

TABLEAU N° 3.

DÉVIATIONS DE l'aiguille aimantée.	INTENSITÉS DU courant électrique.	DÉVIATIONS DE l'aiguille aimantée.	INTENSITÉS DU courant électrique.
1°........	...... 0°,50'	21°........	...... 12°,50'
2........	 1,00	22........	 13,30
3........	 1,50	23........	 14,22
4........	 2,00	24........	 15,14
5........	 2,50	25........	...... 16 35
6........	 3,00	26........	 17,57
7........	 3,50	27........	...... 18.78
8........	 4,00	28........	 20,00
9........	 4,50	29........	 21,00
10........	 5,00	30........	...... 22.65
11........	 5,55	31........	 23,92
12........	 6,10	32........	 25,20
13........	 6,62	33........	...... 26 20
14........	 7,15	34........	 27,20
15........	 7,85	35........	 28,74
16........	...... 8.55	36........	 30,28
17........	 9,27	37........	 32,12
18........	 10,00	38........	 34,14
19........	 10,86	39........	 36,07
20........	 11,70	40........	 38,00

14. Les multiplicateurs n'étant pas tous construits sur le même plan, les indications qu'ils donnent ne sont pas comparables entre elles. M. Nobili ayant apprécié l'avantage qu'il y aurait pour les observateurs à opérer toujours dans les mêmes circonstances, a proposé un modèle d'appareil, dont il a construit le type avec tout le soin possible. Je vais en donner la description, dans le cas où

l'on sentirait plus tard la nécessité d'employer un instrument de ce genre.

Le multiplicateur-type se compose de deux parties principales : d'un châssis en bois à quatre fils de cuivre, égaux en diamètre et en longueur, recouverts de soie, et d'une aiguille aimantée pourvue d'un index en laiton, comme l'indique la figure 19. Nous rapportons ici la description complète que cet habile physicien nous en a donnée (1):

TT.	Châssis en bois; il est fixé à la table avec quatre vis. Voyez, pour les détails, la fig. 3.
CC.	Cercle en métal, divisé en 360°; il couvre le châssis, auquel il est fixé par quatre petites vis.
DEF.	Équerre en laiton fixée verticalement sur la table, et qui porte à son extrémité le fil de suspension.
dfg.	Petit mécanisme appliqué à l'extrémité F, pour abaisser ou élever l'aiguille magnétique.
HHH.	Cloche en verre; il y a sur la table une rainure circulaire pour la recevoir.
I, II, III, etc.	Chevilles en laiton, auxquelles aboutissent les extrémités des fils des quatre multiplicateurs.
ns.	Aiguille magnétique. Longueur.... *ns* = 83,5 millim. Son diamètre. = $\frac{2}{3}$ de millim.
ii.	Index de laiton.
pp.	Petit cylindre du même métal : il est composé de deux pièces qui se vissent ensemble, et qui portent, l'une, l'aiguille *ns*, l'autre, la pointe *ii*. La partie supérieure reçoit, dans un petit trou, la pointe du petit anneau *o*, où se termine le fil de suspension. Hauteur *pq* = 8 millim. Diamètre = 2 Le poids du cylindre *pq*, avec l'aiguille *ns* et l'index *ii*, est de 0,79 gramm. L'aiguille seule pèse 0,21 grammes.

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XLIII, p. 146.

La distance entre l'aiguille *ns* et l'index *ii* est de 2 millim.

Fig. 20. Châssis.

Longueur...	$ab = 90$ mill.	
Largeur...	$aa = ab = 11$	
Hauteur..	$cd = 13$.	

Les côtés *mn*, *op* dépassent de 2,5 millimètres les plans *cd*; cette hauteur suffit pour recevoir le cordon sans empêcher l'application immédiate du cercle CC sur les côtés *mn*, *mn*.

xy. Ouverture rhomboïdale pour introduire l'aiguille *ns* dans l'intérieur du châssis.

ff. Petites oreilles en métal appliquées aux côtés inférieurs *op*, pour fixer avec des vis le châssis à la table A A' A.

Les fils des quatre multiplicateurs sont tordus ensemble dans tout l'intervalle qu'ils occupent autour du châssis; ils se séparent, en sortant du châssis, l'un de l'autre, et on les amène jusqu'aux chevilles I, II, III, etc.

La longueur du cordon est de 870 millimètres : c'est la partie qui enveloppe le châssis. La torsion du cordon est telle que les fils détordus s'allongent de 17 millim. Du châssis aux chevilles, chaque fil est long de 150 millim. Dans cette mesure n'est pas comprise la portion qui est roulée autour des chevilles, et qui est longue de 140 à 150 mill. En coupant des fils de la longueur de 1480 millimètres, on en a assez pour ces différentes parties.

Le diamètre des fils est de $\frac{2}{3}$ de mill.; ce diamètre devient presque de 1 mill. lorsque les fils sont couverts de soie. On recuit les fils avant de les couvrir.

Quand bien même on aurait suivi, dans la construction de ce multiplicateur, les indications précédentes, il y a encore une autre condition à remplir, sans laquelle il ne serait pas comparable à celui qui sert de type : c'est une égalité aussi parfaite que possible dans le magnétisme des aiguilles. Pour y arriver, M. Nobili prend

une cinquantaine d'aiguilles d'acier de la même qualité et de dimensions égales; il les aimante à saturation, et prend note du magnétisme de chaque aiguille, en observant l'effet que leurs pôles produisent sur une aiguille mobile. Après avoir disposé les aiguilles dans l'ordre de leur magnétisme, il choisit le groupe qui donne les déviations moyennes; il en trouve quatre ou cinq qui ont une force à peu près égale. Il en trouve aussi un plus grand nombre qui ont un magnétisme un peu plus fort; mais il les ramène facilement à la force des premières, en frottant les pôles trop forts avec le pôle opposé d'un petit barreau. Ayant ainsi 14 ou 15 aiguilles de la même force, il les place successivement dans son appareil, en les suspendant à un fil de soie, les écarte de leur position d'équilibre de trente degrés, et compte le nombre d'oscillations qu'elles font dans 2', par exemple; la différence est ordinairement assez petite. Pour savoir si cette différence peut être négligée dans la construction des galvanomètres comparateurs, il opère d'abord avec deux multiplicateurs montés avec deux aiguilles, et trouve, par exemple, qu'elles exécutent toutes les deux 33 oscillations en 2 minutes. Il établit ensuite la communication entre les deux instruments pour déterminer les indications qu'ils donnent lorsqu'ils sont traversés par le même courant : bien entendu qu'il n'emploie qu'un seul fil. Ce courant est fourni par un élément voltaïque que l'on plonge, plus ou moins, dans une eau acidulée, pour avoir des courants de diverses intensités.

Quand les différences entre les déviations sont très-petites, il en conclut que les deux multiplicateurs marchent ensemble. Mais pour en être plus sûr, il compare encore les deux instruments, en portant dans l'un l'aiguille qui se trouvait dans l'autre. D'autres aiguilles sont soumises à la même épreuve : il en trouve qui donnent des différences d'un degré, quoique leurs intensités magnétiques, mesurées par les oscillations, soient les mêmes. Cette différence ne peut être attribuée qu'à la distribution du magnétisme dans les aiguilles.

Lorsque la différence du magnétisme se borne à une oscillation, cette cause d'erreur est si faible qu'elle peut être entièrement compensée. M. Nobili ne doute pas qu'avec un choix convenable des aiguilles les plus parfaites, on ne parvienne à écarter les erreurs qui dépassent un demi-degré. Les deux instruments qu'il est parvenu à monter s'accordent à un quart de degré près, dans un intervalle de 65°.

Ce physicien, qui a donné une attention particulière à la construction des multiplicateurs, a indiqué deux méthodes pour les graduer. Il a appelé l'une, méthode des doubles, et l'autre, méthode des différences. La première exige l'emploi du multiplicateur à deux fils, et a quelque analogie avec celle que j'ai exposée précédemment. Elle présente, suivant lui, des inconvénients, en raison de la difficulté qu'il y a à se procurer des courants égaux dans tous les points de l'échelle; inconvénients que je n'ai pas eu l'occasion de remarquer ; c'est ce motif qui l'a engagé à la remplacer par la seconde.

Méthode des différences.

15. Ayant reconnu préalablement que les intensités des courants qui correspondent aux quatre premiers degrés de déviation sont proportionnelles aux degrés ; que du 4ᵉ au 7ᵉ cette proportionnalité est en défaut d'une moitié, puisque le courant de 7°, double du courant de 4°, est à peu près égal à 8 au lieu de 7 ; il en résulte que, du 4ᵉ au 7ᵉ degré, il y a une unité qui doit être partagée sur la valeur numérique des courants des trois degrés 5, 6, 7. De même, le courant de 11°, double du courant de 7°, est 16, et égale par conséquent cour. 7° + 8'. Il y a donc du 7ᵉ au 11ᵉ degré une différence de 8, qu'il faut partager entre les valeurs des quatre degrés 8, 9, 10, 11. Après le 11ᵉ degré, les différences augmentent de plus en plus, et à 54° le courant est déjà mille fois plus intense que celui de 1°. Comme la loi n'est pas connue, on est obligé d'avoir recours à de nombreuses expériences pour établir les rapports que l'on cherche.

Voici quelques-uns des résultats auxquels il est parvenu :

cour.	de	3°	=	cour. 13°	—	cour. 12°	
cour.	de	4	=	cour. 16	—	cour. 15	
cour.	de	$5\frac{1}{2}$	=	cour. 19	—	cour. 18	
cour.	de	7	=	cour. 22	—	cour. 21	
cour.	de	8	=	cour. 24	—	cour. 23	
cour.	de	10	=	cour. 27	—	cour. 26	
cour.	de	12	=	cour. 31	—	cour. 30	
cour.	de	13	=	cour. 34	—	cour. 33	
cour.	de	14	=	cour. 37	—	cour. 36	
cour.	de	15	=	cour. 40	—	cour. 39	
cour.	de	17	=	cour. 45	—	cour. 44,	etc.

Telle est la série des différences qui lui a servi à établir la table des intensités què je rapporte ici.

TABLE DES INTENSITÉS.

Tableau N° 4.

FORCE DU COURANT EN DEGRÉS.	FORCE DU COURANT EN NOMBRES.	FORCE DU COURANT EN DEGRÉS.	FORCE DU COURANT EN NOMBRES.
1	1	31	187,68
2	2	32	206,87
3	3	33	227,06
4	4	34	218,25
5	5,20	35	270,55
6	6,40	36	293,96
7	7 80	37	318,48
8	9 40	38	344,27
9	11,20	39	371,18
10	13,20	40	399,36
11	15,33	41	429,14
12	18,19	42	460,52
13	21,19	43	493,62
14	24,52	44	528,56
15	28,18	45	565,34
16	32,18	46	604,20
17	36,78	47	645,14
18	41,98	48	688,28
19	47,78	49	733,74
20	54,18	50	781,52
21	61,[illegible]8	51	832,50
22	69,08	52	886,68
23	77,68	53	914,41
24	87,08	54	1005,69
25	97,67	55	1070,87
26	109,53	56	1139,95
27	122,73	57	1213,33
28	137,10	58	1291,01
29	152,63	59	1373,39
30	169,49	60	1460,47

16. M. Melloni (1) a formé une table des intensités, en se servant du thermo-multiplicateur. Il commence par maintenir l'aiguille du galvanomètre à un degré quelconque de déviation; condition facile à remplir en plaçant une lampe allumée à une distance convenable de l'une des deux faces de la pile thermo-électrique. Sup-

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. LIII, p. 5.

posons l'axe du thermo-multiplicateur perpendiculaire au méridien magnétique, et qu'à l'échauffement de sa face droite ou gauche corresponde une déviation dans le même sens sur le galvanomètre. Produisons maintenant, en approchant convenablement la lampe, une déviation assez forte, de 44° par exemple, et ramenons l'aiguille à zéro par l'interposition d'un écran métallique. Faisons-la dévier maintenant de 42° de l'autre côté, au moyen d'une seconde lampe placée devant la seconde face. Pour ramener l'aiguille à zéro, on emploiera, comme précédemment, un écran métallique.

Si l'on ôte les deux écrans, on n'aura plus qu'une différence d'effets, attendu que les deux courants thermo-électriques cheminent en sens contraire. Si les intensités étaient toujours proportionnelles aux arcs, l'aiguille aimantée s'arrêterait à 2° à droite; mais il n'en est pas ainsi. Les deux degrés de différence qui existaient entre les déviations partielles 44 et 42 provenaient d'une force plus grande que celle qui est nécessaire pour lui faire parcourir les deux premiers degrés. Il en résulte que l'arc parcouru, comparé à la différence des deux déviations, servira à mesurer la force correspondante. Supposons que l'aiguille s'arrête à 8°; alors on en conclura que l'effort nécessaire pour faire passer l'aiguille de 42 à 44° est quatre fois plus grand que celui qu'il est nécessaire d'employer pour le faire passer de zéro à 2°. Si l'aiguille se fût arrêtée à 10°, l'effet aurait été cinq fois plus grand, et ainsi de suite.

M. Melloni est obligé de s'appuyer pour cela sur le principe que la proportionnalité des degrés aux forces dans l'arc qui sert de mesure comparative, existe jusqu'à une certaine déviation. Cette supposition est justifiée par l'expérience; car il a trouvé que, dans les galvanomètres dont la construction est soignée et le système astatique aussi parfait que possible, les arcs sont proportionnels aux intensités du courant depuis zéro jusqu'à 20°. On conçoit, d'après cela, comment on peut établir une échelle des intensités. Mais comme cette échelle doit

dépendre de la sensibilité du système astatique et de la distribution du fil métallique sur les châssis, elle variera donc dans chaque instrument. Nous donnons ici la table que M. Melloni a formée pour son galvanomètre, dans lequel les intensités sont proportionnelles aux angles depuis zéro jusqu'à 20°.

TABLEAU N° 5.

DEGRÉS.	FORCES.	DEGRÉS.	FORCES.	DEGRÉS.	FORCES.
20°	20° 0'	29°	33° 4'	38°	55° 4'
21	21,1	30	35,3	39	58,5
22	22,3	31	37,4	40	61,9
23	23,7	32	39,6	41	65,5
24	25,1	33	41,8	42	69,3
25	26,6	34	44,1	43	76,4
26	28,2	35	46,7	44	78,0
27	29,9	36	49,5	45	83,2
28	31,6	37	52,4		

Si l'on compare les intensités des courants consignées dans les tableaux n°s 3, 4 et 5, on ne trouvera aucun accord entre elles. Ces différences tiennent au mode de construction de chaque multiplicateur.

M. Nervander a cherché aussi à graduer le multiplicateur. Il n'a pas trouvé d'autre moyen, pour résoudre la question d'une manière simple, que de substituer à la forme parallélipipédique du châssis ordinaire la forme cylindrique, et d'enrouler le fil comme l'indique la fig. 21. Il a remarqué qu'avec une moindre longueur de fil, on obtient des déviations plus grandes qu'avec le multiplicateur de Schweiger, toutes choses égales d'ailleurs.

Au moyen de ce changement, les intensités du courant sont soumises à une loi simple, dans une certaine amplitude de déviations, qui dépend de la construction de chaque multiplicateur. Dans l'étendue de cette amplitude, le courant est exactement proportionnel à la tangente de l'angle de déviation.

Je dois faire remarquer que M. Nervander n'a placé régulièrement autour de son châssis cylindrique qu'une seule rangée de fil, et qu'il n'a pas cherché à vérifier si la loi serait encore exacte dans le cas où il y en aurait plusieurs qui ne seraient pas disposées aussi symétriquement.

M. Peltier a construit un multiplicateur dont les déviations de l'aiguille aimantée sont sensiblement proportionnelles aux intensités du courant, comme il s'en est assuré en enroulant plusieurs fils égaux autour du châssis. Au lieu de deux aiguilles pour former le système astatique, il en prend quatre, croisées à angle droit, comme l'indique la figure 21 bis. Lorsqu'un des pôles est chassé par le courant, l'autre tend à rentrer dans le châssis. Il a trouvé que les indications étaient assez exactes jusqu'à 45°.

Je me suis étendu sur la construction des multiplicateurs et leur graduation, parce qu'ils sont d'une utilité indispensable dans une foule de cas où l'on n'a pas d'autres appareils pour déterminer certaines propriétés du fluide électrique.

CHAPITRE III.

DU DÉGAGEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ.

§ Ier. *De l'influence de la chaleur sur le dégagement de l'électricité, et de la production des courants thermo-électriques.*

17. Il y a production de chaleur dans la plupart des cas où il se dégage de l'électricité; et comme la chaleur trouble elle-même l'équilibre du principe électrique dans les corps, nous devons commencer par exposer les effets électriques qu'elle produit, si nous voulons connaître sa participation à l'effet général.

Examinons d'abord comment la chaleur agit sur le fluide électrique. Les premiers physiciens qui s'occupèrent de recherches sur l'électricité pensaient que la chaleur exaltait la force répulsive de chaque fluide. Pour le prouver, ils firent l'expérience suivante : après avoir fermé hermétiquement à la lampe un tube de verre électrisé intérieurement, ils trouvèrent que ce tube donnait des signes d'électricité très-marqués en élevant sa température; ils en conclurent que la chaleur exaltait son action; mais le verre, devenant en même temps meilleur conducteur de l'électricité, laissait passer une portion du fluide accumulé dans l'intérieur du tube, de sorte qu'on ne pouvait en conclure que son pouvoir fût exalté. Pour reconnaître s'il y a réellement une action, il faut opérer de la manière suivante : on prend une bouteille de Leyde AB (fig. 216.), à la surface de laquelle on fixe une tige conductrice RS. Cette bouteille est fermée par un bouchon *gg*, traversé par

une tige *bb*, fixée elle-même, par sa partie supérieure, à une cloche en verre *abe*, et portant à l'extrémité opposée une masse de métal P. La bouteille ayant été électrisée intérieurement, on la place dans un autre vase rempli de glace, de manière que la tige RS soit en dehors : puis, après avoir retiré le bouchon, on fait chauffer fortement la masse P, que l'on replace dans la bouteille. La cloche *abc*, qui s'applique aussi bien que possible sur la bouteille, empêche que celle-ci ne se décharge. La masse P échauffe peu à peu l'intérieur de la bouteille sans changer sensiblement la température des parois extérieures, qui sont environnées de glace. Si on présente en même temps à un électroscope le bouton S, on n'y aperçoit aucun signe d'électricité libre, plus grand que celui qu'il manifestait avant; par conséquent, la chaleur n'a pas exalté l'action du fluide électrique de l'intérieur de la bouteille; car si elle l'eût fait, l'électricité de la surface extérieure aurait été décomposée, et la tige RS aurait communiqué à l'électroscope l'électricité repoussée.

Mais si l'action de la chaleur est nulle sur le fluide libre, pour exalter ses propriétés attractives ou répulsives, il n'en est pas de même de celle qu'elle exerce sur le fluide neutre, comme nous allons le voir.

Si l'on introduit un fil de platine dans un tube de verre, fermé à la lampe par une de ses extrémités, que l'on fasse communiquer le bout libre du fil avec le plateau inférieur du condensateur de l'électroscope de Bonhenberg, en les séparant avec une bande de papier humide, et touchant avec le doigt le plateau inférieur, et qu'au moyen d'une lampe à alcool on porte au rouge la partie du tube qui est fermée, on n'obtient aucune charge électrique quand on enlève le plateau supérieur. Mais si l'on enroule (fig. 22), à l'extrémité du bout du tube qui a été fermé, un fil de platine dont l'extrémité libre communique avec le sol, et que l'on chauffe fortement ce bout, au point de le faire rougir, le fil intérieur transmet au condensateur une charge très-sensible

d'électricité positive. Analysons maintenant ce phénomène. Nous avons deux fils de platine *ab*, *a'b'*, dont les bouts *a* et *b*, d'une part, *a'* et *b'* de l'autre, n'ont pas la même température. Ces fils communiquent ensemble, par l'intermédiaire d'un tube de verre qui, en raison de sa température élevée, est conducteur de l'électricité; or, comme la matière même du verre n'influe aucunement sur les effets produits, on ne peut les attribuer qu'à une différence de température, qui est à l'avantage du fil extérieur; le bout dont la température est la plus élevée prend l'électricité positive, et l'autre l'électricité négative. Ce résultat nous conduit au principe suivant, dont nous aurons plusieurs fois l'occasion de vérifier l'exactitude: Lorsqu'un fil de métal non oxidable, ou une suite *a*, *a'*, *a''*, *a'''*, etc., de particules métalliques, liées entre elles par la force d'agrégation, est en contact, par l'une de ses extrémités, avec une source de chaleur *b*, d'une nature quelconque, à l'instant où la chaleur commence à se propager dans ce fil, cette extrémité prend l'électricité positive, tandis que l'électricité négative est chassée dans tous les sens; mais *a'* recevant de la chaleur de *a*, *a''* de *a'*, etc., il en résulte que la seconde particule qui s'échauffe aux dépens de la première, prend à celle-ci, à chaque instant, de l'électricité positive et lui donne de l'électricité négative, et ainsi de suite pour les autres particules. On a donc une distribution de l'électricité semblable à celle qui est indiquée dans la fig. 23; la décomposition du fluide électrique sera immédiatement suivie d'une recomposition, qui produira ainsi une multitude de courants électriques moléculaires. D'après cela, le fil, ou le système de points matériels, ne peut avoir d'électricité libre qu'aux extrémités. Si donc on touche le bout incandescent avec un corps conducteur assez volumineux pour qu'il ne s'échauffe pas sensiblement, tel qu'un morceau de papier humide, on lui enlève son électricité positive, et il ne reste au fil que l'électricité négative. Revenons maintenant aux deux fils de platine, separés par un petit tube

de verre; chacun d'eux donnera naissance à des effets électriques, qui seront très-probablement plus marqués dans le fil extérieur, dont la température est la plus élevée, que dans le fil intérieur, puisqu'il est plus immédiatement en contact avec le foyer de chaleur. Il suit de là que l'électricité négative du premier s'écoulera dans le sol, tandis que l'électricité positive s'accumulera sur le condensateur, en passant à travers le verre chaud. Cet effet est le même, quelle que soit la source de chaleur employée; car si, après avoir fait rougir fortement le tube, on retire la lampe, le phénomène est semblable. Cette expérience tend à montrer que, pendant le mouvement de la chaleur dans une barre de métal, il s'opère une suite de décompositions et de recompositions de fluide électrique qui ont de l'analogie avec le mode de propagation de la chaleur dans les corps. Car on admet généralement que lorsqu'une barre de métal plonge, par un de ses bouts, dans un milieu plus chaud que l'air environnant, chaque point infiniment petit de cette barre reçoit de la chaleur par le contact du point qui précède et en communique à celui qui le suit; qu'un même point est influencé non-seulement par ceux qui le touchent, mais encore par ceux qui l'avoisinent à une petite distance en avant et en arrière, de manière qu'il se produit dans l'intérieur de la barre un véritable rayonnement de molécule à molécule.

L'expérience suivante vient à l'appui de la théorie que je viens d'exposer. Soit un circuit fermé *abc* (fig. 24), formé d'un fil de platine, dont les deux bouts sont soudés avec soin aux extrémités du fil d'un galvanomètre à fil court, dont la sensibilité électrique est telle que l'aiguille aimantée se porte immédiatement à 80°, quand on met dans la bouche les points de jonction d'un fil composé de deux autres cuivre et fer soudés par un de leurs bouts, et dont les bouts libres sont en communication avec le multiplicateur; si l'on élève la température d'une partie quelconque du fil de platine loin des soudures, l'équilibre des forces électriques ne saurait être troublé, puis-

qu'en raison de l'homogénéité de toutes les parties, la propagation de la chaleur se fait également à droite et à gauche des points chauffés. Mais il n'en est plus de même quand on fait un nœud en *o*, ou mieux encore une spirale, fig. 25, de manière cependant qu'il n'y ait pas discontinuité dans le fil, et que l'on porte le foyer de chaleur à peu de distance de cette spirale en *f*; on a aussitôt un courant électrique, dont la direction indique que l'électricité positive va à gauche du point *f*, ce qui ne peut provenir que d'une différence dans la propagation ou le mouvement de la chaleur à droite et à gauche du point *o*. La petite masse *o* doit effectivement s'échauffer aux dépens de la chaleur transmise par la partie *fi* du fil. Maintenant, si l'on prend une distance $fi' = fi$, il est bien évident qu'en *i* et *i'*, le mouvement de la chaleur ne doit pas être le même, en raison de la présence de la masse *o*. Le courant ne peut être attribué qu'à la différence de ces deux mouvements. Or la spirale *o* s'échauffant continuellement aux dépens de la chaleur, *fi* doit prendre l'électricité positive et repousser l'électricité négative. Le palladium se comporte comme le platine. Un fil d'or, substitué au fil de platine, ne produit aucun effet; le fil d'argent, qu'un effet très-faible, ainsi que le fil de cuivre.

Ce courant est produit dans un fil de platine qui n'a pas de solution de continuité; mais on obtient des effets semblables lorsqu'il y a solution de continuité. Fixons aux deux extrémités du fil du multiplicateur deux fils de platine parfaitement homogènes, et enroulons les bouts libres en spirale pour augmenter les surfaces; plongeons l'une de ces spirales dans la flamme d'une lampe à alcool; retirons-la quand elle est rouge, et posons-la sur l'autre, qui est à la température ordinaire : la déviation de l'aiguille aimantée indiquera de suite l'existence d'un courant qui ira du côté chaud au côté froid, c'est-à-dire que le bout qui s'échauffe prend à l'autre l'électricité positive et lui donne l'électricité négative, conformément au principe précédent.

18. Avec un fil de cuivre parfaitement décapé, si l'on élève la température de l'un de ses bouts, en plaçant le foyer de chaleur à une certaine distance des points chauffés, pour oxider le moins possible sa surface, et qu'on le pose sur celui qui est à la température ordinaire, il ne se produit pas de courant; mais si l'on oxide préalablement la surface afin d'interposer un corps étranger entre la partie chaude et la partie froide, il y a alors un courant qui va de l'une à l'autre, comme dans le fil de platine. L'application d'une couche très-mince de mercure, d'étain, d'or ou d'argent, sur la surface des bouts du fil de cuivre, suffit pour produire le même effet que la couche d'oxide. De là nous pouvons conclure avec beaucoup de vraisemblance que, dans le premier cas, où les deux surfaces sont très-nettes, le cuivre étant bon conducteur, la solution de continuité n'oppose qu'un faible obstacle au passage de la chaleur de la partie chaude à la partie froide; de sorte que l'on peut regarder sa propagation comme étant sensiblement la même à droite et à gauche de la solution de continuité; tandis que, dans le second cas, l'interposition d'un corps étranger modifie suffisamment la propagation de la chaleur pour produire les mêmes effets que dans le platine.

L'or et l'argent, quand ils ne sont pas purs, donnent des résultats semblables à ceux du cuivre; lorsqu'ils renferment du cuivre, la chaleur développe à leur surface une petite couche d'oxide, qui met obstacle à la propagation de la chaleur, et alors on a courant du chaud au froid. Il est bien entendu que les deux fils de cuivre, d'or ou d'argent, doivent être pris dans le même bout; car s'ils ne sont pas homogènes, il en résulte des effets particuliers.

Veut-on avoir un courant continu avec un fil de cuivre : on coupe ce fil en deux, et l'on réunit deux des bouts au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre (fig. 26), tandis que les deux autres bouts commu-

niquent avec un multiplicateur ou tout autre appareil; en plaçant une lampe à alcool, à droite ou à gauche des points de jonction, en *a* par exemple, on a un courant qui suit la direction *acb*, aussitôt que la surface du cuivre est recouverte d'une couche d'oxide.

Les faits précédents nous indiquent que le pouvoir conducteur des métaux pour la chaleur est une des causes qui influent sur la production des effets thermo-électriques. Si l'on opère avec des métaux oxidables, tels que l'antimoine, le fer et le zinc, on a des effets inverses, c'est-à-dire que les courants vont du froid au chaud, comme M. Nobili l'a observé (1).

Quelle est la cause de ce changement? Est-il le résultat d'une action chimique, ou de toute autre action? c'est ce que l'expérience suivante va nous dire. Opérons dans l'huile, afin d'éviter l'oxidation des métaux; maintenons l'un des bouts de la lame de fer ou de zinc dans ce liquide privé d'eau et d'air, dont on élève la température jusqu'à 60° ou 80°; puis, posons sur ce bout l'autre environné également d'huile à la température ordinaire, le courant ira encore du froid au chaud. L'action de l'air sur le métal n'est donc pas la cause du trouble survenu dans l'équilibre des forces électriques. Peut-être doit-on la rechercher, soit dans la conductibilité de ces métaux pour la chaleur, soit dans la couche d'oxide qui recouvre la surface des métaux, ou dans certaines modifications que la chaleur fait éprouver à leurs facultés électriques.

Le plomb et l'étain donnent des effets variables entre lesquels on ne peut établir de corrélation. Il résulte des faits précédents, que dans les circuits formés d'un seul métal, de la classe de ceux qui sont fortement thermo-électriques, s'il se trouve dans l'intérieur de la masse des corps étrangers qui tendent à modifier la propagation

(1) Bibl. univ. de Genève, t. XXXVII, p. 118.

de la chaleur, les deux électricités se séparent là où ces corps sont placés. On en a un exemple dans le fer. Lorsque l'on fixe les deux bouts d'un fil de fer aux extrémités d'un multiplicateur, et que l'on fait rougir pendant quelques instants une petite portion du fil de fer loin des soudures, afin que celles-ci ne puissent pas réagir, il se produit presque toujours un courant, en chauffant à droite ou à gauche de la portion dont la température a été portée au rouge. Pour expliquer ce fait, il faut admettre que la portion du métal qui est recuite est la cause de la séparation des deux électricités.

19. Quelle que soit l'idée qu'on ait conçue du principe électrique naturel, on ne peut douter qu'il n'existe dans tous les corps, et qu'il ne soit mis en mouvement par différentes causes. Comme il est formé de la réunion des deux électricités, si, en cheminant dans les corps, il rencontre un obstacle qui puisse être franchi plus facilement par l'une des deux électricités que par l'autre, il y a aussitôt rupture dans leur équilibre : elles se séparent pour se recombiner dans la portion qui leur présente moins de difficultés. C'est probablement là une des causes de la production des courants thermo-électriques.

Pour que l'on puisse mieux apprécier les causes qui influent sur la production des phénomènes thermo-électriques, je vais exposer les courants qui ont lieu dans les corps homogènes, quand toutes les parties n'ont pas la même température.

M. Seebeck, qui a découvert cette classe de phénomènes, a observé que, dans un anneau circulaire, de bismuth ou d'antimoine, si l'on refroidit une moitié, tandis que l'on élève la température de l'autre, il se produit aussitôt un courant électrique. Ce phénomène a été l'objet de recherches étendues de la part du docteur Yelin (1), de MM. Cumming, Sturgeon et autres (2). Ce dernier

---

(1) Munich., 29 avril 1823, 12 p. in-4°.

(2) Philos. Magaz., juillet 1831.

physicien l'a analysé avec des détails convenables. Voici quelques uns des effets qu'il a observés.

Dans un rectangle *abcd* (fig. 27), formé de quatre barreaux de bismuth, de 0,3 de pouce anglais de largeur et de 3,2 pouces de longueur, si l'on élève la température de différentes parties avec la pointe de la flamme d'une lampe à alcool, et que l'on place au-dessus du rectangle une aiguille aimantée délicatement suspendue ;

Quand on chauffe le point	*a*,	le courant va de *b*	en *a*.
	b,	*b*	*a*.
	c,	*b*	*a*.
	d,	*a*	*b*.

En chauffant à peu de distance de *b*, M. Sturgeon a trouvé, après quelques essais, un point qui ne donnait aucun courant, et dont la distance à *b* était située à un peu plus de $\frac{1}{2}$ pouce de *b*. En chauffant le demi-pouce le plus voisin de l'angle, le courant allait de *b* en *a*, et dans une direction opposée lorsqu'on portait le foyer de chaleur de l'autre côté.

Sur le côté *cd*, il n'existait qu'un seul point neutre placé à égale distance des angles *c* et *d*.

Dans un second cadre (fig. 28) de même longueur que le précédent, et d'une largeur d'environ 1,75, chaque angle était un point neutre, et il s'en trouvait encore un au milieu de chaque grand côté.

M. Sturgeon attribue la présence de ces points neutres à quelques modifications particulières produites pendant le coulage des barreaux : il a remarqué que l'intensité de chaque courant variait en raison du point chauffé, et dépendait en grande partie de la structure du barreau.

En soumettant à l'expérience des anneaux circulaires de bismuth, dont le diamètre extérieur était de 4 pouces et celui de l'intérieur de 3,5 pouces, et élevant la température de divers points, il a découvert des points actifs et des points neutres qui, étant chauffés, ne dérangeaient pas l'équilibre des forces électriques. Il a observé dans l'anneau circulaire, comme dans les circuits d'une

autre forme, que le point où la matière a été versée dans le moule est resté inactif quand on élevait sa température. Ce point est le premier qui a dû se solidifier. Cette circonstance doit être prise en considération dans l'explication que l'on donnera des phénomènes thermo-électriques.

M. Sturgeon a varié la forme des morceaux de bismuth, dans l'espoir de découvrir la cause qui met le fluide électrique en mouvement.

Un barreau rectangulaire *ac*, chauffé en *b*, est devenu fortement magnétique. Le courant se dirigeait vers le côté *c*, comme l'indique la figure (fig. 29); deux faces étaient à l'état neutre. Il reconnut que lorsque toute l'extrémité *c* était chauffée uniformément, le courant atteignait le maximum d'intensité, et passait par les mêmes faces du prisme en se dirigeant en sens inverse. Quand il chauffait uniformément le bout *a*, il ne se manifestait aucun courant jusqu'à ce que la chaleur eût atteint un certain point *b* : l'effet était alors le même que si l'on eût chauffé ce point. En supprimant l'extrémité neutre, le reste du barreau devenait magnétique, quelle que fût l'extrémité à laquelle la chaleur fût appliquée.

Dans un barreau cylindrique (*aa'*, *bb'*, fig. 30) d'antimoine, de 8 pouces de longueur et de 0,75 de pouce de diamètre, en chauffant uniformément l'une de ses extrémités, il obtint une distribution de courant indiquée par la figure.

Le cylindre se trouvait ainsi partagé en deux moitiés par un plan passant suivant son axe ; les lignes ponctuées étaient neutres, et les lignes *ab*, *cd* et *a' b'* actives.

Un autre barreau cylindrique (fig. 31), de 6 à 8 pouces de long, dont les deux extrémités avaient été coupées pour qu'on eût des sections nettes : quand on chauffait seulement une moitié d'une des sections, il se produisait une série de courants dont on se rendra aisément compte sur la figure. Ce mode de distribution

paraît dépendre de l'arrangement cristallin des molécules.

Avec un cône d'antimoine, uniformément dense autour de son axe, on a eu des courants dirigés de haut en bas ou de bas en haut, suivant que l'on refroidissait ou que l'on échauffait la base (fig. 32 et 33). Les cônes employés avaient 4,5 pouces de hauteur, et leur base 2,20 pouces de diamètre.

En chauffant le sommet du cône, le courant était très-faible et sa direction incertaine. Les cylindres et les cônes de bismuth lui ont donné les mêmes résultats.

Il paraît que le développement de tous ces courants, dans des masses de bismuth ou d'antimoine de diverses formes, dont toutes les parties n'ont pas la même température, est dû à l'état cristallin que prennent les molécules; car si l'on ajoute au bismuth ou à l'antimoine une petite quantité d'étain, pour leur enlever leur texture cristalline, ils perdent en même temps leur faculté thermo-électrique.

Je dois ajouter que M. Sturgeon a reconnu que tous les métaux possèdent des propriétés thermo-électriques analogues, pourvu que l'on opère sur des masses plus ou moins considérables.

Il serait à désirer que l'on pût déterminer avec exactitude la direction des courants qui sont produits dans un cristal de bismuth ou d'antimoine, dont toutes les parties ne possèdent pas la même température, afin de connaître leurs relations par rapport aux différents sens de clivage. Au surplus, on conçoit l'existence de ces courants, puisque nous savons déjà que, la chaleur ne se propageant pas également dans toutes les parties d'un corps, il peut y avoir séparation des deux principes électriques là où elle rencontre un obstacle.

§ II. *Des effets thermo-électriques produits dans les circuits formés de deux métaux différents.*

20. Nous avons maintenant à nous occuper de la produc-

tion des effets électriques par la chaleur, dans les circuits composés de deux ou plusieurs métaux. Nous verrons ensuite s'il est possible de les rattacher à ceux qui ont été décrits dans le paragraphe précédent.

M. Seebeck, qui les a observés le premier, s'est servi d'un appareil composé d'un cylindre de bismuth ou d'antimoine, aux extrémités duquel était soudée une lame de cuivre en fer à cheval. Dès l'instant qu'il chauffait l'une des soudures, il s'établissait, dans tout le circuit, un courant électrique qui allait du bismuth au cuivre, ou du cuivre à l'antimoine, selon l'appareil employé.

Cette expérience fut répétée et développée par un grand nombre de physiciens. M. Cumming (1) indiqua un procédé très-simple. Il construisit un rectangle métallique (fig. 34), dont trois côtés étaient formés de fils d'argent et le quatrième d'un fil de platine; ce rectangle fut suspendu de manière que le platine se trouvait en bas. Ayant chauffé un des points de jonction, il lui imprima un mouvement de rotation de gauche à droite, quand il présentait le pôle d'un aimant à l'autre soudure. En suspendant le circuit métallique sur l'aimant même, et élevant la température d'une des jonctions, le circuit se mit aussitôt à tourner.

Continuons à suivre la marche analytique que nous avons adoptée, pour exposer les phénomènes qui nous occupent.

On obtient, dans un fil de platine, un courant électrique, quand on réunit ensemble les deux bouts, au moyen de deux anneaux passés l'un dans l'autre, et que l'on porte le foyer de chaleur à droite ou à gauche des points de jonction. Quand on opère avec un fil de cuivre, il faut préalablement oxider la surface de celui qui se trouve dans la flamme. Il en est de même des métaux oxidables.

---

(1) Annals of philosophy, sept. 1833.

Si l'on forme des circuits avec des fils de différents métaux, et que l'on élève successivement la température de l'une des soudures, on a des courants qui permettent de ranger les métaux dans l'ordre suivant, relativement à leurs propriétés thermo-électriques : bismuth, platine, plomb, étain, cuivre, or, argent, zinc, fer et antimoine. Dans ce tableau, chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède, et négatif relativement à ceux qui le suivent.

En cherchant parmi les propriétés calorifiques des corps celles qui ont quelque rapport avec les précédentes, on ne trouve que la chaleur spécifique, car l'ordre des métaux rangés suivant leur chaleur spécifique est bismuth, plomb, or, platine, étain, argent, antimoine, zinc, cuivre et fer. Quoique le rang de chaque métal, dans ces deux tableaux, ne soit pas le même, on ne peut néanmoins s'empêcher de reconnaître une certaine analogie, puisque, à peu d'exceptions près, les métaux les plus électro-négatifs sont ceux qui ont le moins de chaleur spécifique ; cette chaleur doit donc exercer une certaine influence sur les phénomènes thermo-électriques. De plus, nous avons vu que le pouvoir conducteur pour l'électricité était aussi une des causes des phénomènes thermo-électriques ; voilà donc déja deux causes qui concourent à l'effet général.

Continuons l'examen de ces phénomènes : on prend un circuit disposé comme l'indique la figure 35, dans lequel le cuivre et le fer sont d'abord en contact au point *a*, et, partout ailleurs, ils sont séparés aux soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, par des fils de platine, d'or et d'étain. On commence à porter la soudure *a* à 50°, tandis que l'on maintient à zéro toutes les autres : on observe alors l'intensité du courant ; puis, après, on porte successivement à 50° les soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, en maintenant également toutes les autres à zéro. Dans ces diverses circonstances, les courants ont toujours la même intensité ; de sorte que le fer et le cuivre, quand ils sont en contact ou séparés par d'autres

métaux, donnent naissance à un courant dont l'intensité est la même ; ce courant ne dépend par conséquent que de la température des deux points extrêmes. Ce fait est très-important, puisqu'il tend à démontrer que le courant ne provient pas d'une action de contact, mais bien d'une différence dans la température des deux métaux.

La température n'étant pas la même aux deux soudures d'un circuit fermé, composé d'un fil de fer et d'un fil de cuivre, de diamètre quelconque, je vais montrer suivant quelle loi varie l'intensité du courant, en discutant les résultats consignés dans le tableau suivant :

	TEMPÉRATURE DE LA première soudure.	TEMPÉRATURE DE LA deuxième soudure.	DÉVIATION DE l'aiguille aimantée.	INTENSITÉ CORRESPONDANTE du courant.
1re Exp.	50°	00°	7°.15'	11°
	100	00	12,75	22
	150	00	16,00	31
	200	00	18,60	37
	250	00	19,00	40
	300	00	00,00	00
2e Exp.	50	50	00,00	00
	100	*id.*	7.25	11
	150	*id.*	11,75	20
	200	*id.*	14,00	26
	250	*id.*	15,25	29
	300	*id.*	16,00	30,50
3e Exp.	50	00	00,00	00
	100	100	00,00	00
	150	*id.*	6 00	9
	200	*id.*	9,50	15
	250	*id.*	11,00	18
	300	*id.*	00,00	00

Nous voyons que l'intensité 11, du courant produit par les températures 100° et 50°, dans la deuxième expérience, est égale à la différence des intensités 22 et 11 des courants obtenus dans la première expérience, pour les températures 100 et 50° de la même soudure, l'autre étant à zéro. De même l'intensité 20, deuxième

expérience, est égale à la différence des intensités 31 et 11, première expérience, correspondantes aux températures 150 et 100°; ainsi de suite. Concluons de là cette règle, que dans le circuit fer et cuivre, lorsqu'on élève chacune des soudures à une température différente, l'intensité du courant est égale à la différence des intensités du courant produit successivement par chacune de ces températures, l'autre étant à zéro, et non, comme on aurait pu le croire, à l'intensité du courant qui résulte d'une différence seule de température.

Le courant est dû au mouvement de la chaleur dans chaque métal, et non à des effets chimiques résultant de l'action de l'oxigène sur les métaux. Pour le prouver, on prend une cloche en verre dans laquelle on pratique deux ouvertures latérales, à chacune desquelles on fixe, avec du mastic, un double crochet en platine, qui est mis en communication intérieurement avec l'un des bouts du fil fer et cuivre, et extérieurement avec le multiplicateur. On fait le vide sous la cloche, dans laquelle on introduit ensuite du gaz hydrogène bien sec; on élève ensuite la température des points de jonction cuivre et fer avec une lentille qui concentre les rayons solaires sur ces points: on a aussitôt un courant électrique dirigé dans le même sens que celui qui est produit. Le courant ne peut donc être attribué qu'au mouvement de la chaleur.

Nous savons ce qui se passe dans un circuit composé de deux métaux, quand on fait varier la température des deux soudures; nous allons voir la marche que suit l'intensité du courant, lorsque l'une des soudures ayant une température constante, on élève successivement celle de l'autre.

Si l'on opère avec un circuit platine et palladium, on trouve que depuis 0 jusqu'à 350°, pour chaque accroissement égal de température, l'intensité du courant croît de la même quantité; mais il n'en est pas de même dans les circuits où se trouvent d'autres métaux, du moins au-delà de certaines limites, car la loi des inten-

sités devient très-composée; quelques exemples vont en donner la preuve.

DÉSIGNATION du circuit.	TEMPÉRATURE d'une des soudures, l'autre étant à aéro.	DÉVIATION de l'aiguilla aimaotée.	INTENSITÉ du courant.
	50°	.... 10°	.... 72°
	100	.... 20	 120
+ − Fer = Cuivra...	150	.... 25	 145
	200	.... 27,50	 158
	250	.... 28,50	 163,50
	300	.... 29	 166,20
	Au rouge sombre la déviation change de sens.		
	0	 0	− + Or = Zinc; à 70°, la variation est d'environ 2°; mais en continuant à élever la taopérature, ella diminue; et à 150° ella est nulle, alors elle recommence en sens Inverse.
	20	 2	
	39	 4	
	58	 6	
	80	 8	
+ − Argant = Zinc..	120	 10	
	160	 8	
	187	 6	
	207	 4	Deviation.
	215	 2	150°..... 0
	225	 0	180 2
			195 4
	225	 0	+ Or=Zinc.. 219 6
	236	 2	220 8
	247	 4	240 10
	253	 6	255 12
+ − Zinc. = Argent.	262	 8	275 14
	270	 10	
	281	 12	
	300	 14	
	290	 12	
	282	 10	

Des résultats consignés dans ce tableau, on tire les conséquences suivantes :

1° Dans un circuit fer et cuivre, l'une des soudures étant à zéro, et l'autre croissant depuis zéro jusqu'à 300°, l'intensité du courant ne croît pas proportionnellement à la température; à 300°, elle est à peine sensible; mais si l'on continue à élever la température, le courant devient stationnaire, son intensité commence à décroître, et finit par changer de direction quand la température est au rouge sombre.

2° Le zinc et l'argent, le zinc et l'or donnent des effets semblables. L'argent est d'abord positif; le courant augmente d'intensité jusqu'à 120°, diminue, et devient nul, pour se reproduire en sens inverse, c'est-à-dire que le zinc devient positif et conserve cet état jusqu'à sa fusion. Aussitôt que l'on cesse d'élever la température, le courant diminue et finit par reprendre sa première direction. L'or se comporte de même que l'argent. Quelle est la cause de ce singulier changement? On ne peut l'attribuer qu'à des modifications dans l'état d'agrégation des molécules, et non à l'action de l'air sur le zinc, car il a également lieu quand la soudure plonge dans de l'huile privée d'air et d'eau.

Le circuit fer et cuivre donne des effets constants, quels que soient le diamètre des fils et leur mode de contact, c'est-à-dire qu'il y ait soudure ou simplement contact avec une forte pression; mais il n'en est pas de même avec les circuits zinc et or, zinc et argent, les effets varient d'intensité suivant le diamètre des fils et leur mode de contact; quelquefois même le premier courant est à peine sensible. Ce phénomène, quoiqu'on ne puisse pas en donner les lois, prouve du moins que l'intensité des courants thermo-électriques dans les circuits métalliques peut être sujette à bien des variations; cependant sa marche est régulière dans certaines limites.

Je vais d'abord montrer que, dans la plupart des circuits métalliques, l'intensité du courant croît proportionnellement à la température jusqu'à 40° au moins. L'inspection seule du tableau suivant prouve cette vérité.

MÉTAUX qui composent le circuit.	TEMPÉRATURE de l'une des soudures, l'autre étant à zéro.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉ du courant.	INTENSITÉ calculée.
Fer et Argent	10	27	18,80	16,00
	20	40	38	38
	30	45	50,76	57
	40	52	76	76
Fer et Cuivre	10	28	20	20
	20	41	40,70	40
	30	48	59,92	60
	40	»	»	80
Cuivre et Platine	10	18	10	10
	20	28	20	20
	30	36	30,28	30
	40	41	40,40	40
Argent et Étain	10	28	20	20
	20	41	40,70	40
	30	48	59,92	60
	40	»	»	»
Cuivre et Argent	10	13	6,60	6,71
	20	22	13,30	13,42
	30	28	20	20,13
	40	34	27,20	26,84

21. Tous ces résultats ne sont pas comparables entre eux, attendu que le pouvoir conducteur de chaque circuit n'est pas le même; ils ne peuvent donc servir à déterminer la relation qui existe entre les intensités des courants, et par conséquent le pouvoir thermo-électrique de chaque métal, c'est-à-dire la faculté dont jouit chaque métal d'émettre telle quantité d'électricité, dans son contact avec un autre métal, à une température donnée. Pour remplir ce double but, on opère avec un circuit composé de fils de tous les métaux dont on veut trouver la faculté thermo-électrique. En ne changeant pas de circuit, la conductibilité est toujours la même, et les résultats deviennent comparables entre eux. Toutes les soudures sont maintenues à la température zéro, excepté celle sur laquelle on expérimente, et dont on élève la température de la manière indiquée figure 18. Voici les résultats obtenus

avec un circuit composé de fils de 8 métaux différents, de deux décimètres de long chacun, d'un demi-millimètre de diamètre, soudés avec soin bout à bout, comme l'indique la fig. 35, et dont les extrémités sont mises en communication avec un multiplicateur gradué à fil court :

CIRCUIT N° 1.

DÉSIGNATION des soudures.	TEMPÉRATURE de la soudure soumise à l'expérience.	DÉVIATIONS correspondantes de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉS des courants électriques.
+ Fer, − Étain	20	36,50	31,24
+ Cuivre, − Platine	20	16,00	8,55
+ Fer, − Cuivre	20	34,50	27,96
+ Argent, − Cuivre	20	4,00	2 »
+ Fer, − Argent	20	33 »	16,20
+ Fer, − Platine	20	39 »	36,07
+ Cuivre, − Étain	20	7 »	3,50
+ Zinc, − Cuivre	20	2 »	1 »
+ Argent, − Or	20	1 »	0,50

En comparant les diverses intensités, on trouve que pour une température de vingt degrés, chaque métal acquiert une puissance thermo-électrique telle, que l'intensité du courant produit au contact de deux métaux est égale à la différence des quantités qui représentent chacune de ces actions dans chaque métal. Ainsi, si l'on désigne cette puissance par p, on aura pour l'intensité du courant, lorsqu'on élève la soudure fer cuivre, p. fer — p. cuivre = 27,96; de même pour le platine et le fer, p. fer — p. platine = 36,07. En retranchant la première expression de la seconde, on a p. cuivre — p. platine = 8,11, au lieu de 8,55 que donne l'expérience. La soudure fer étain donne 31,24; celle cuivre étain, 3,50. La différence fer cuivre est donc 27,74, au

lieu de 27,96 que donne l'expérience. Il est donc bien démontré que l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions thermo-électriques produites dans chaque métal par la même température. Essayons de déterminer chacune de ces actions.

Si l'on représente la puissance ou l'action thermo-électrique du fer, à vingt degrés, par x, on aura :

p. fer	x
p. argent	$x - 26{,}20$
p. or	$x - 26{,}70$
p. zinc	$x - 26{,}96$
p. cuivre	$x - 27{,}96$
p. étain	$x - 31{,}24$
p. platine	$x - 36,$

Dans cet arrangement, chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède. Si x était connu, le pouvoir thermo-électrique s'en déduirait; mais, comme le fer est positif par rapport à tous les métaux qui entrent dans le circuit, on peut en conclure que sa valeur est supérieure à 36.

22. D'un autre côté, l'or, l'argent et le zinc ont des pouvoirs à peu près égaux; or, quand on cherche, parmi les propriétés calorifiques, celles qui sont sensiblement les mêmes pour ces différents métaux, on ne voit que les pouvoirs rayonnants qui s'y rapportent. En supposant donc que ces derniers soient proportionnels aux pouvoirs thermo-électriques, ce qui forcerait d'admettre que, dans les circuits métalliques, il y a au contact, un rayonnement semblable à celui qui a lieu dans l'air, et que la différence des pouvoirs rayonnants est aussi une des causes qui influent sur le sens et l'intensité du courant, on parvient alors, mais pour ce cas-là seulement, à déterminer la valeur de x. On a

$$x : x - 26{,}70 :: 15 : 12,$$

15 et 12 étant les pouvoirs rayonnants du fer et de l'or.

En tirant de cette proportion la valeur de x, et la substituant dans les expressions P. fer, P. argent, etc., on trouve :

P. fer............	133,50.
P. argent.........	107,30.
P. or.............	106,80.
P. zinc...........	106,54.
P. cuivre.........	106,54.
P. étain..........	102,26.
P. platine........	97,50.

Ces valeurs se rapportent à un circuit donné, car si on le change, les nombres ne sont plus les mêmes. Il est facile néanmoins d'obtenir des nombres qui sont indépendants du pouvoir conducteur du circuit : la valeur P. fer — P. cuivre est proportionnelle à la température et au pouvoir conducteur du circuit. Si donc l'on représente par δ la différence P. fer — P. cuivre pour un circuit dont le pouvoir conducteur est 1 et la température 1, on aura, pour un pouvoir m et une température t,

$$\text{P. fer} - \text{P. cuivre} = m\,t\,\delta,$$

et, pour une autre différence,

$$\text{P. fer} - \text{P. platine} = m\,t\,\delta';$$

d'où l'on tire

$$\frac{\text{P. fer} - \text{P. cuivre}}{\text{P. fer} - \text{P. platine}} = \frac{\delta}{\delta'}.$$

Ce rapport est indépendant du pouvoir conducteur du circuit et de la température ; il est encore le même pour un circuit quelconque, en employant une température t' et un pouvoir conducteur m'.

L'expérience vérifie complétement ce résultat théorique, comme on peut le voir ci-après :

Circuit n° 2.

DÉSIGNATION des soudures.	TEMPÉRATURE de la soudure soumise à l'expérience.	DÉVIATIONS de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉS des courants électriques.
+ Fer, − Platine	20	43 »	46,50
+ Fer, − Cuivre	20	39,50	35,18
+ Cuivre, − Platine	20	20,00	11,70
+ Cuivre, − Plomb	20	7,50	3,75

Circuit n° 3.

DÉSIGNATION des soudures.	TEMPÉRATURE de la soudure.	DÉVIATION de l'aiguille aimantée.	INTENSITÉS du courant.
+ Fer, − Cuivre	20	40 »	38 »
+ Fer, − Platine	20	44,75	51 »
+ Cuivre, − Platine	20	22 »	13,30

Dans le circuit n° 1, on trouve :

$$\frac{\text{P. fer} - \text{P. platine}}{\text{P. fer} - \text{P. cuivre}} = \frac{36{,}07}{27{,}96} = 1{,}29.$$

Dans le circuit n° 2, on trouve :

$$\frac{\text{P}'.\ \text{fer} - \text{P}'.\ \text{platine}}{\text{P}'.\ \text{fer} - \text{P}'.\ \text{cuivre}} = \frac{46{,}50}{35{,}18} = 1{,}32.$$

Dans le circuit n° 3, on trouve :

$$\frac{\text{P}''.\ \text{fer} - \text{P}''.\ \text{platine}}{\text{P}''.\ \text{fer} - \text{P}''.\ \text{cuivre}} = \frac{51}{38} = 1{,}34.$$

Ces rapports sont sensiblement égaux, comme l'indique la théorie. Il n'existe entre eux que de légères

différences, qui rentrent dans la limite des erreurs que l'on peut commettre en mesurant des phénomènes aussi délicats que les précédents.

La moyenne de ces trois nombres étant 1,32, si l'on fait P. fer — P. cuivre = 1, et que l'on adopte encore la valeur $\frac{\text{P. fer}}{\text{P. cuivre}} = \frac{15}{12}$, on aura

Métaux.	Pouvoirs thermo-électriques.
P. fer	5
P. argent	4,07
P. or	4,052
P. zinc	4,035
P. cuivre	4
P. étain	3,89
P. platine	3,68.

Ces valeurs seront les mêmes pour un circuit quelconque, et pour tous les cas où les pouvoirs thermo-électriques des métaux croissent comme les températures; ce qui a lieu pour celles qui sont au-dessous de 50°, et dans la supposition où ces pouvoirs sont proportionnels au pouvoir rayonnant des métaux. C'est en faisant de nouvelles expériences qu'on pourra voir jusqu'à quel point cette hypothèse est fondée. Dans tous les cas, si on ne l'admettait pas, on aurait toujours pour les pouvoirs thermo-électriques :

P. fer	$= x$
P. argent	$= x - 0{,}93$
P. or	$= x - 0{,}948$
P. zinc	$= x - 0{,}965$
P. cuivre	$= x - 1$
P. étain	$= x - 1{,}11$
P. platine	$= x - 1{,}32$.

23. Ces valeurs sont indépendantes du plus ou moins de chaleur, et du refroidissement dans l'air de la partie

des fils ou barres situés au dehors de la source de chaleur. Pour le prouver, il suffit de former un circuit de plusieurs fils alternatifs de fer et de cuivre n'ayant pas les mêmes dimensions en longueur et en grosseur, et d'élever successivement la température de chaque soudure au même degré, toutes les autres étant à zéro, et de voir quelles sont les intensités des autres courants. L'expérience montre que ces dernières sont égales.

DIMENSIONS des fils formant un même circuit.	TEMPÉRATURE des soudures.	DÉVIATIONS de l'aiguille aimantée.
Fer, long. 3 décim., diamètre 3 millim.. Platine, long. 1 décim., diam. 3 millim...	.... 15°.......	.... 14.
Fer, long. 1 décim., diam. 3 mill....... Platine, long. 1 décim., diam. 1 mill.....	.... 15	.... 14.
Fer, long. 3 décim., diam. 1 mill........ Platine, long. 3 décim., diam. 1 mill.....	.... 15	.... 14.
Fer, long. 3 décim., diam $\frac{1}{5}$ de mill.... Platine, long. 3 décim., diam. $\frac{1}{5}$ de mill..	.... 15	
Fer, long. 3 décim., diam. $\frac{1}{5}$ .... Platine, long. 3 décim., diam. $\frac{1}{10}$	.... 15	.... 14.

On peut objecter à cette permanence dans l'égalité de l'intensité des courants, que la conductibilité du circuit étant diminuée par la présence de fils très-fins de platine et de fer, il ne passe plus alors dans le circuit qu'un courant d'une certaine intensité, et qu'au-delà aucun courant ne saurait être rendu sensible. S'il en était ainsi, on devrait trouver une certaine température inférieure à celle de 50°, passé laquelle le courant n'augmente plus; et comme cette circonstance ne se présente

pas, puisque l'intensité augmente comme la température, il faut donc admettre que, pour la même conductibilité électrique et la même température inférieure à 50°, l'intensité du courant est indépendante de la longueur ou du diamètre des fils.

Rien n'est plus simple que de prouver l'exactitude des résultats consignés dans les différents tableaux ci-dessus. En effet, dans les circuits fermés, à part un petit nombre d'exceptions, il y a absence de courant quand la température est la même à toutes les soudures, c'est-à-dire, que la somme des courants qui vont dans un sens est égale à la somme des courants qui vont dans l'autre sens. Dans le circuit n° 3, si nous effectuons ces deux sommes, on trouve pour l'une :

C. fer. cuivre = 38
C. cuivre. platine = 13,30,
———
51,30

et pour l'autre, fer platine = 51,1, valeur sensiblement semblable à la première. Cette vérification doit inspirer toute confiance dans les résultats qui ont servi de base à nos calculs.

Jusqu'ici il n'a été question que des phénomènes thermo-électriques produits dans des circuits tout métalliques; on peut en obtenir aussi dans des circuits où se trouvent des corps qui sont rangés parmi les conducteurs médiocres. M. Nobili (1) nous en a donné un exemple. Cet habile physicien prend de la pâte d'argile, et en forme différents petits bâtons cylindriques de la longueur de 2 ou 3 pouces et de 3 à 4 lignes de diamètre, et entoure l'extrémité de chaque cylindre de coton imbibé d'un liquide conducteur, qui sert à les mettre en communication directe avec un multiplicateur. Une des extrémités libres est amincie en pointe, et, après l'avoir

(1) Bibliothèque de Genève, t. XXXVII, p. 74.

échauffée au rouge à la flamme d'une lampe, il l'applique avec pression sur l'extrémité froide de l'autre cylindre : il se produit alors un courant qui va de la partie chaude à la partie froide. Cet effet est dû à la réaction l'une sur l'autre de deux portions de l'eau qui n'ont pas la même température.

§ III. *Du dégagement de l'électricité par la chaleur dans diverses substances minérales cristallisées.*

Nous n'avons plus à nous occuper que des effets de la chaleur dans les corps mauvais conducteurs. On conçoit parfaitement que, dans les corps conducteurs, il ne puisse y avoir que des courants électriques, puisque les deux électricités se recombinent aussitôt qu'elles sont dégagées; mais dans les autres corps, elles restent plus ou moins de temps séparées, et il doit en résulter des effets de tension. Commençons par étudier ces effets dans les corps cristallisés, dont la forme déroge à la loi de symétrie, attendu que les sommets n'étant pas composés de faces semblables, la chaleur ne doit pas se propager de la même manière de chaque côté.

Les Hollandais nous ont apporté des Indes orientales, et surtout de l'île de Ceylan, un minéral très-court, auquel les naturels ont donné le nom de tournamal ou tire-cendres, en raison de la propriété dont il jouit d'attirer les cendres quand on le jette dans le feu.

Quelques-unes des propriétés de cette pierre ont été consignées pour la première fois, par Lémery, dans l'Histoire de l'Académie des Sciences pour l'année 1717. Il annonça que ce minéral jouit de la propriété, après avoir été chauffé, d'attirer et de repousser les corps légers qu'on lui présente, à la manière d'un corps électrisé.

Æpinus est le premier qui ait prouvé que les attractions et répulsions de la tourmaline étaient dues à l'action du fluide électrique. Il remarqua aussi le premier la polarité, c'est-à-dire la propriété dont jouit ce miné-

ral d'avoir ses deux extrémités dans deux états électriques contraires (1). Il aperçut également une lueur électrique en approchant dans l'obscurité un corps conducteur d'une tourmaline placée sur un fer chaud.

Canton (dans un Mémoire lu à la Société royale de Londres en 1759) avança que la tourmaline n'est électrique que lorsque la température monte ou descend. On lui doit aussi cette observation importante que, lorsqu'une tourmaline a acquis la polarité électrique, si on la casse en deux, chaque fragment possède la polarité, avec cette condition que les parties séparées sont douées d'une électricité contraire. Voici les principaux effets électriques de la tourmaline :

L'une des extrémités, quand elle est chauffée, prend l'électricité positive, et l'électricité négative lorsqu'elle se trouve dans un état de refroidissement; les mêmes causes produisent des effets contraires à l'autre extrémité.

L'état électrique peut varier de cinq manières :

A l'un des pôles :	A l'autre :	
(+)	(—)	
(+)	(+)	
(—)	(—)	
(+)	(o)	au passage.
(—)	(+).	

Le premier état a lieu lorsque toute la surface de la pierre est exposée également à un refroidissement ou à un échauffement.

(+)	(+)
(—)	(—)

(1) Mémoires de l'Académie des Sciences et Belles-Lettres de Berlin, 1756, et Recueils de différents Mémoires sur la tourmaline, Pétersbourg, 1762.

Les pôles prennent le même état électrique, soit positif, soit négatif, si l'un des pôles seulement est dans un état de refroidissement, tandis que l'autre est dans un état d'échauffement.

(+) .... (o)

Cette condition se présente toutes les fois que l'un des pôles se trouve dans un état d'échauffement ou de refroidissement, et l'autre dans un état stationnaire.

24. Hauy, qui attachait une grande importance aux caractères physiques des substances minérales, n'a donné qu'une théorie incomplète des propriétés électriques de la tourmaline, attendu qu'il n'a pas distingué les effets électriques produits selon que la température est croissante ou décroissante. C'est lui qui a découvert cependant que les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie, dans la configuration des sommets, sont les seuls qui deviennent électriques par la chaleur.

Pour observer tous les phénomènes que je viens de rapporter, on place la tourmaline dans une petite chape de papier, fixée à l'extrémité d'un fil de cocon qui tombe dans un cylindre de verre posé sur une lame de métal, dont on élève la température avec une lampe à alcool (fig. 36). A mesure que l'intérieur du vase s'échauffe, la température de la tourmaline s'élève; et aussitôt qu'elle devient électrique, il suffit de lui présenter un corps faiblement électrisé pour observer les attractions et les répulsions. Un thermomètre placé dans l'intérieur du cylindre sert à indiquer la température. Voici les résultats obtenus avec une tourmaline brune légèrement translucide, de 3 centimètres de longueur et de 3 millimètres de diamètre, dont on a élevé graduellement la température :

A 30 degrés, la polarité électrique a commencé à être sensible à l'approche d'un corps faiblement électrisé ;

elle a continué jusqu'à 150 degrés, et même au-delà, pourvu que la température ne cessât pas de monter; car aussitôt qu'elle est devenue stationnaire, la polarité a disparu, pour reparaître en sens inverse quand la température a commencé à baisser. Le moment du passage d'une polarité à l'autre était très-court. On pourrait donc croire que l'intensité électrique de chaque pôle est en raison de la vitesse de l'échauffement ou du refroidissement; mais il ne paraît pas en être ainsi, comme on peut le voir en mesurant l'intensité électrique à une époque quelconque. On place à cet effet dans l'intérieur de la cloche, et à peu de distance de chacune des extrémités de la tourmaline, deux tiges verticales en fer, communiquant chacune avec l'un des pôles d'une pile sèche, dont l'intensité électrique peut être regardée comme constante dans un temps très-court, surtout si l'on a l'attention de l'éloigner du foyer de chaleur. Aussitôt que la tourmaline devient électrique, elle se place entre les deux tiges, les pôles inverses en regard; et si on la dérange de cette position, elle y revient par une suite d'oscillations dont le nombre, dans un temps donné, sert à déterminer l'intensité de l'électricité.

TEMPÉRATURE de la Tourmaline.	DURÉE des oscillations.	NOMBRE des oscillations.
100	30	0
90	30	10
80	»	13
70	»	15
60	»	15
50	»	16
40	»	14
30	»	13
20	»	7

La température a été portée à 115°; à 105°, la tour-

maline, quoiqu'elle fût électrique avant, a commencé à se fixer entre les deux tiges verticales qui communiquaient avec les pôles de la pile sèche ; à 100°, les oscillations étaient mesurables. Depuis 115 jusqu'à 100°, moment où le refroidissement était le plus rapide, l'intensité électrique croissait très-lentement ; de 100° à 90°, l'accroissement a été rapide, puis l'a été moins jusqu'à 70° ; de 70° à 40°, il est resté sensiblement stationnaire ; de 40° à 20°, il a diminué à peu près dans la même proportion qu'il avait augmenté depuis 100° jusqu'à 70°. La polarité électrique a disparu entièrement à 15°, quoiqu'elle eût commencé à paraître à 50°, quand on a élevé la température. Plusieurs tourmalines ont donné des résultats semblables. On voit donc que l'intensité électrique de chaque pôle n'est pas en raison directe de la vitesse du refroidissement. La loi qu'elle suit est très-compliquée et ne peut être déterminée avec exactitude ; il paraît seulement que la tourmaline est douée d'une certaine force coercitive qui s'oppose à la recomposition immédiate des deux électricités. C'est le seul moyen d'expliquer pourquoi elle est encore électrique par un refroidissement lent à 14°, tandis qu'elle ne le devient qu'à 30° par échauffement. S'il est facile de mesurer l'intensité électrique de la tourmaline pendant son refroidissement, il n'en est pas de même lorsqu'on élève sa température ; cela tient à ce que, dans l'échauffement, la force coercitive est sans effet pour augmenter l'intensité de la polarité.

Après avoir exposé ce qui se passe dans une tourmaline dont toutes les parties ont été également échauffées ou refroidies en même temps, examinons ce qui arrive quand l'une des extrémités reçoit plus de chaleur que l'autre. On enferme chaque bout de la tourmaline dans un petit tube de verre, qui a sensiblement le même diamètre, pour qu'il s'y applique exactement ; puis on l'assujettit par son milieu à un tube de verre avec un fil de platine. Si l'on chauffe l'un des deux bouts, par exemple celui qui est positif par échauffement, l'extré-

mité de la tourmaline qui y correspond s'échauffera d'abord aux dépens du tube, prendra la même température que lui, puis se refroidira en même temps. Dans le premier cas, tant que la température ne commencera pas à s'élever à l'autre bout, la tourmaline ne possédera qu'une seule électricité. On s'assure de ce fait, en présentant successivement tous les points de la tourmaline aux disques de clinquant de deux électroscopes de Coulomb, chargés l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative. Cet effet ne se produit qu'autant que la température va en décroissant, et que le côté opposé à celui qui a été chauffé n'a pas encore atteint la température suffisante pour qu'il y ait manifestation d'électricité. Il n'y a donc qu'une seule électricité de mise en jeu. Comment ce phénomène peut-il être produit, quand on sait que dans tout dégagement d'électricité il y a toujours émission des deux fluides? Il faut qu'il y ait eu une électricité de dissimulée ou d'absorbée par l'air : c'est ce que les recherches les plus minutieuses n'ont pu nous indiquer. Ce qu'il y a de certain, c'est qu'on peut faire acquérir une seule électricité à un des côtés d'une tourmaline, sans que l'autre en prenne, et sans qu'on considère par conséquent l'état de celui-ci comme transitoire, c'est-à-dire passant d'un état électrique à un autre, comme il a été dit précédemment.

Revenons maintenant au bout positif où l'on a supposé la température croissante. Aussitôt qu'elle est stationnaire, son état électrique cesse pour reparaître en sens inverse quand elle baisse. Dans le même temps, le côté négatif, suivant que la température est constante ou descendante, est à l'état zéro, ou possède l'électricité négative ou positive. Ces faits prouvent que lorsqu'on échauffe inégalement les deux côtés d'une tourmaline, chacun d'eux prend un état électrique, indépendant de l'autre, de sorte que chacun d'eux prend la même espèce d'électricité que si toute la pierre possédait la température correspondante à ce côté.

Nous avons examiné le cas où la température était croissante à l'extrémité positive, et dans un état stationnaire au bout opposé. Rien n'est plus simple que d'obtenir cette dernière condition : il suffit de mettre ce dernier dans un petit tube rempli de glace. Cette précaution doit être prise toutes les fois que l'on veut mettre de l'exactitude dans les expériences.

Haüy avait annoncé comme un fait nouveau (1), que, dans un cristal, pendant le refroidissement, la polarité électrique s'était d'abord établie, avait disparu, puis s'était reproduite en sens inverse. Ces effets ne peuvent être attribués qu'à des alternatives d'échauffement et de refroidissement, dont le célèbre minéralogiste n'a jamais tenu compte dans ses expériences.

La plupart des tourmalines présentent les effets que nous venons de mentionner; mais leur intensité varie tellement dans les cristaux provenant de la même localité, que l'on est porté à attribuer ces variations à des différences dans leur dimension, leur structure ou leur couleur. On emploie deux modes pour rendre électriques les tourmalines : l'échauffement et le refroidissement lents, l'échauffement et le refroidissement rapides. Le premier s'obtient en élevant graduellement la température de la cloche dans laquelle est suspendue la pierre, éteignant la lampe, et laissant le refroidissement s'opérer lentement. Le deuxième mode consiste à transporter la tourmaline, qui est à une température basse, dans un milieu où elle est élevée, et à observer ce qui se passe pendant qu'elle s'échauffe. On la retire ensuite, pour la mettre dans un milieu moins chaud. Les tourmalines qui jouissent de la faculté électrique au plus haut degré l'acquièrent par ces deux modes, tandis que celles qui sont peu électriques ne le deviennent que par le deuxième seulement : il y en a qui ne le sont par aucun des deux.

---

(1) Traité de Physique, t. 1er, p. 503.

J'ai soumis à l'expérience une tourmaline, très-légèrement translucide sur les bords, de 8 centimètres de longueur, et environ 2 millimètres de diamètre; c'est une des plus longues que j'aie vues : elle n'est devenue électrique par aucun des deux modes d'exciter la puissance électrique par la chaleur.

Une deuxième tourmaline, de 6 centimètres $\frac{1}{2}$ de long et d'une grosseur à peu près égale à la précédente, n'est devenue électrique par l'échauffement que lorsque l'élévation de température était rapide, c'est-à-dire, lorsqu'elle passait d'un milieu à 12° dans un autre à 60°. Pendant le refroidissement lent, elle n'a manifesté la polarité électrique qu'à 60°, bien qu'on ait porté la température à 100°. Une troisième et une quatrième avaient sensiblement les mêmes dimensions : longueur, 0,50 millimètres, diamètre, 0,045; nullement électriques par un échauffement progressif; mais elles le devinrent fortement par un changement de température de 15° à 90°, et commencèrent à l'être à 50° par un refroidissement lent.

Six tourmalines, de 0,20 millim. à 0,40 millim. de longueur, et de 0,02 de diamètre, sont devenues électriques par les deux modes de changement de température, et ont manifesté même cette propriété quand le refroidissement a commencé à 100°. Deux tourmalines de 2 centimètres de longueur et de $\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre ont acquis une forte polarité par les plus faibles changements de température, soit pendant l'élévation, soit pendant le refroidissement, quel que fût le mode adopté.

Des fragments de tourmaline ont constamment donné des effets plus marqués que la pierre dans son entier. Par exemple, une tourmaline de 50 mill. de longueur et de 0,015 de diamètre, qui n'était électrique que par un échauffement rapide de 12° à 50°, ayant été cassée en deux parties, chacune d'elles l'est devenue par un échauffement lent. Une autre, de 0,20 millim. de longueur, et de 0,02 millim. de diamètre, commençait à

être électrique à 88° par un refroidissement lent; ayant été brisée, chaque moitié l'est devenue à 100° par le même mode.

Une tourmaline non électrique par la chaleur ayant été partagée en deux, les deux fragments le sont devenus. Ces faits tendent donc à prouver que les phénomènes électriques de la tourmaline varient en raison de la longueur et de la grosseur, et peut-être de la diaphanéité des cristaux, puisque les plus petites tourmalines prennent une polarité très-forte par de faibles changements de température, et que celles qui ont de 5 à 6 centimètres de long perdent déja la propriété de s'électriser par le premier mode, et qu'enfin de grandes tourmalines paraissent être réfractaires.

Dans le cas où cette loi s'appliquerait à des tourmalines de plus en plus petites, il s'ensuivrait que les molécules intégrantes acquerraient une polarité électrique très-intense, pour de faibles variations de température.

On a remarqué que les tourmalines transparentes étaient celles dont les propriétés électriques par la chaleur avaient le plus d'énergie; il y a cependant des cristaux noirs et opaques qui possèdent cette propriété à un degré bien marqué.

25. Plusieurs substances minérales cristallisées présentent les mêmes phénomènes que la tourmaline. M. Haüy a reconnu que ce sont celles dont les cristaux dérogent à la loi de symétrie, c'est-à-dire dont les parties opposées correspondantes ne sont pas semblables par le nombre, la disposition et la figure de leur face. Le sommet qui est le plus chargé de facettes est celui qui manifeste l'électricité positive par refroidissement.

Cantou a reconnu les propriétés électriques dans la topaze; Brard dans l'axinique; Haüy les a observées dans la boracite, la mézotype, l'oxide de zinc, et le sphène.

Dans la boracite, la distribution de l'électricité s'y fait avec des circonstances particulières. Cette substance a pour forme primitive un cube, dans lequel les som-

mets situés aux extrémités d'un même axe ne sont pas formés d'un même nombre de facettes. Ce cristal déroge donc à la loi de symétrie.

Haüy a trouvé que les forces électriques s'exerçaient dans les directions des quatre axes, de manière que celui des deux angles solides relatifs à un même axe, qui se trouvait remplacé par un autre, donnait toujours des signes d'électricité positive par refroidissement, tandis que l'angle solide opposé, qui était resté entier, manifestait constamment l'électricité négative. Les figures 37, 38, 39, représentent des cristaux de tourmaline, de topaze, de boracite, dans lesquels on voit que les sommets ne sont pas semblables.

26. M. Brewster a annoncé qu'un certain nombre de substances jouissaient des propriétés électriques par la chaleur (1), savoir :

Scolézite.	Diamant.
Mézolite.	Orpiment jaune.
Mézotype de Groënland.	Analcime.
Spath calcaire.	Améthyste.
Beryl jaune.	Quartz du Dauphiné.
Sulfate de baryte.	Idocrase.
Sulfate de strontiane.	Mellite.
Carbonate de plomb.	Soufre natif.
Diopside.	Grenat.
Spath fluor, rouge et bleu.	Dichroïte.
Tartrate de potasse et de soude.	Sulfate de magnésie.
Acide tartrique.	Prussiate de potasse.
Oxalate d'ammoniaque.	Suere.
Oxymuriate de potasse.	Acétate de plomb.
Sulfate de magnésie et de soude.	Carbonate de potasse.
Sulfate d'ammoniaque.	Acide citrique.
Sulfate de fer.	Oxymuriate de mercure.

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XXVIII.

M. Brewster cite particulièrement le tartrate de potasse et de soude et l'acide tartrique comme possédant la propriété pyro-électrique à un haut degré. D'après les notions que nous avons acquises sur les propriétés électriques des corps en général, nous devons être peu disposés à reconnaître la propriété pyro-électrique dans des corps dont les cristaux ne dérogent pas à la loi de symétrie; car nous ne voyons pas dans un cube, dont toutes les parties sont semblables, où serait placé chaque pôle, puisqu'il n'y a pas de motif pour que l'une des deux électricités se porte plutôt d'un côté que de l'autre. Analysons le procédé qui a été employé par M. Brewster pour reconnaître l'existence de la pyro-électricité des substances désignées ci-dessus : il prend la membrane interne et excessivement mince de l'arundo phragmites, qu'il coupe en très-petits fragments. Quand ces fragments sont secs, ils sont très-légers et adhèrent au nombre d'un, de deux, de trois, au cristal dont on a élevé la température.

Cette épreuve est insuffisante pour reconnaître la présence de l'électricité dans les corps qui ont été chauffés. En effet, lorsque l'on veut savoir si un corps est électrisé, il faut s'assurer de deux choses : 1° s'il attire les corps légers qu'on lui présente, 2° s'ils sont repoussés immédiatement après le contact. Toutes les fois qu'il y a attraction seulement ou répulsion, on ne peut en conclure que le corps soit électrisé; car on sait qu'un corps qui a été chauffé exerce plusieurs genres d'action sur les corps légers qui sont à la température ordinaire. Je rappellerai à cet égard une observation de Fresnel, qui doit mettre en garde contre toute espèce d'attraction ou de répulsion de la part des corps dont la température a été élevée. Ce physicien attacha aux deux extrémités d'un fil d'acier très-fin, suspendu à un fil de cocon, deux disques de clinquant; le tout placé dans une cloche. Il plaça dans l'intérieur un disque de clinquant dans une position fixe, et fit le vide sous la cloche. En tournant convenablement le fil de torsion, il mit en

contact l'un des disques mobiles avec le corps fixe; ayant fait tomber les rayons solaires, réunis par une loupe, tantôt sur le corps fixe, tantôt sur le disque mobile, celui-ci fut aussitôt chassé brusquement. L'éloignement était quelquefois d'un centimètre. Fresne la prouvé que ce fait ne pouvait être attribué à la petite quantité d'air ou de vapeur restée sous la cloche. Il a montré ensuite que cette répulsion ne provenait nullement d'effets électriques produits par de l'électricité développée par la chaleur; puisque le disque fixe, qui était en métal, communiquait avec le sol au moyen d'une tige métallique; si le disque mobile avait acquis une électricité quelconque, il y aurait eu attraction au lieu d'une répulsion.

Nous savons d'un autre côté que, lorsque l'on présente à un corps dont la température est suffisamment élevée, des corps légers, il y a aussitôt attraction et adhérence de ces derniers sur la surface du premier. D'après ces observations, nous ne pouvons encore admettre que tous les cristaux cités par M. Brewster jouissent de la propriété d'être électriques par la chaleur.

§ IV. *Des effets de la chaleur sur les corps mauvais conducteurs.*

27. Nous ignorons entièrement pourquoi les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie sont électriques par la chaleur : la cause du phénomène réside dans les rapports encore inconnus entre la distribution du fluide électrique dans ces corps et le groupement de leurs molécules; nous en sommes réduits par conséquent à multiplier les expériences pour essayer de découvrir quelques-uns de ces rapports.

Comment l'abaissement et l'élévation de température dans les corps mauvais conducteurs modifient-ils l'action réciproque des deux fluides électriques qui composent le fluide neutre? C'est une question qui se rattache naturellement à celle du développement de l'électricité

dans la tourmaline, considérée comme corps mauvais conducteur.

C'est un fait constaté depuis long-temps, que la chaleur, en pénétrant dans les substances métalliques, diminue leur conductibilité électrique, tandis qu'elle l'augmente dans le verre, la gomme laque et autres corps mauvais conducteurs; par conséquent, lorsque l'on soumet ces derniers à l'influence d'un corps électrisé, pendant l'échauffement ou le refroidissement, il s'y produit des phénomènes électriques de décompositions dépendants de leurs pouvoirs conducteurs.

Substituons à la tourmaline, dans l'appareil qui a servi à étudier ses propriétés électriques (fig. 36), un petit tube de verre d'un millimètre de diamètre et de 8 ou 10 centimètres de longueur. A la température ordinaire, quand les parois de la cloche sont parfaitement sèches, si l'on présente extérieurement un bâton de gomme laque électrisé au petit tube, celui-ci est attiré rapidement par suite de la décomposition de son fluide neutre, qui a lieu, même au travers du verre, comme Newton l'a observé le premier. Il n'en est plus de même quand la cloche est recouverte d'une couche d'eau hygrométrique, puisque le verre devient alors conducteur de l'électricité. Mais vient-on à élever la température, il ne se manifeste aucun effet d'attraction, jusqu'à ce que la chaleur soit suffisante pour enlever l'humidité; mais si, à 25° environ, on éteint la lampe, le petit tube est attiré aussitôt, et continue à l'être tant que dure le refroidissement. En élevant de nouveau la température à 30°, non-seulement le tube est attiré, mais il acquiert encore, par suite de la décomposition de son fluide naturel, deux pôles qui disparaissent presque aussitôt que le corps électrisé est retiré; tandis que, si on les fait naître au moment où l'on éteint la lampe, ils persévèrent pendant plus ou moins de temps. Quand la température est portée à 100 ou 150°, la polarité ne s'établit dans le tube, sous l'influence du corps électrisé, qu'au moment où le thermomètre commence à baisser. Dans

tous les cas, elle dure pendant une partie du temps du refroidissement. Mais si, à un instant quelconque, on élève de nouveau de 1° à 2° la température du milieu où est le petit tube de verre, la polarité disparaît aussitôt. Ces effets ont de l'analogie avec ceux que présente la tourmaline pendant le refroidissement, avec cette différence néanmoins que l'influence d'un corps électrisé détermine dans le verre l'effet qui est produit naturellement dans la tourmaline. Ce rapprochement n'est pas sans intérêt pour la constitution des corps.

Pour éviter l'influence des courants d'air au dehors du cylindre, qui enlèvent de l'électricité au bâton de gomme laque, et celle des courants du dedans au dehors, on dispose l'appareil de la manière suivante.

La partie supérieure du cylindre est fermée hermétiquement avec une plaque de verre, sur les bords de laquelle on colle du papier : on interrompt par ce moyen la communication de l'intérieur avec l'extérieur. Puis, sur la surface extérieure de la cloche, on fixe, perpendiculairement, un tube de verre de 3 à 4 décimètres de longueur, et d'un diamètre assez grand pour qu'on puisse y introduire le bâton de gomme laque que l'on veut soustraire à l'influence des courants d'air provenant de la combustion de l'alcool. Malgré ces précautions, on obtient également l'attraction du petit tube au moment du refroidissement, quand la température a été portée de 20° à 25°. Ainsi les courants extérieurs et ceux du dedans au dehors n'ont eu aucune part sur l'action produite. La polarité électrique et son mode de disparition ont lieu comme précédemment. Il est de plus bien évident qu'à mesure que la plaque de métal sur laquelle la cloche est posée s'échauffe, la couche d'air qui lui est contiguë ne tarde pas à s'élever, et cède ainsi sa place à une autre, de manière qu'il s'établit un courant d'air chaud de bas en haut, et un autre d'air froid de haut en bas. Aussitôt que la lampe est éteinte, la plaque éprouve un refroidissement qui est d'abord très-faible; les courants continuent donc, mais avec un peu moins

de vitesse. De même, lorsqu'on commence à élever la température, ils augmentent peu à peu de vitesse; or, dans le premier cas, avec le cylindre et la petite cloche, il y a des phénomènes qui ne se montrent pas dans le second, tels que la polarité électrique, qui n'est permanente que dans le refroidissement, et l'attraction du petit tube par le bâton de gomme laque. Il faudrait donc admettre qu'une faible diminution dans la vitesse d'un courant d'air donne naissance à des phénomènes électriques qui ne se montrent pas, du moins dans certaines limites, lorsque cette vitesse éprouve une légère augmentation.

Rien n'autorise à le supposer; car, dans l'état actuel de nos connaissances sur les propriétés du fluide électrique, un courant d'air chaud ne fait autre chose que d'enlever l'électricité qui se trouve en équilibre sur la surface d'un corps près duquel il passe. Cela ne suffit pas pour que de légères modifications dans l'intensité d'un courant d'air produisent des effets aussi différents. Je ferai encore remarquer qu'en découvrant par en haut la cloche, quand la température de l'intérieur est à 150°, et que le refroidissement commence, les courants d'air sont beaucoup plus forts que lorsque l'on chauffe dans les températures au-dessous de 50° : ainsi la disparition des pôles ne vient pas des courants d'air. Il y a donc d'autres causes que celles-là auxquelles il faut recourir pour expliquer les phénomènes : ces causes sont la dilatation et la contraction des molécules du verre, qui paraissent agir ici comme dans la tourmaline.

Quant à l'effet instantané qui a lieu dans les températures inférieures à 50°, aussitôt que la lampe est éteinte, et quoique le thermomètre continue encore à monter de quelques degrés, on peut l'attribuer à la différence de la propagation de la chaleur dans le petit tube de verre et le thermomètre. Comme il est probable que le phénomène se passe à la surface, celle du tube doit se ressentir plus vite des effets du refroidissement que le thermomètre. Tous les verres ne sont pas pro-

pres à ces expériences; ceux que l'on fabrique maintenant, et qui sont trop alcalins, ne maintiennent que difficilement la polarité. Il faut prendre des verres anciens, si l'on veut réussir complétement. Un petit cylindre de gomme laque, substitué au petit tube, est aussi attiré rapidement par le bâton électrisé, au moment du refroidissement à 20° ou 25°; mais la polarité électrique est très-difficile à y établir, et encore est-elle de peu de durée.

Pour rendre ces effets comparables, il faut que le corps électrisé, que l'on présente aux petits cylindres de verre ou de gomme laque, possède une électricité sensiblement constante; l'un des pôles d'une pile sèche convient parfaitement à cet usage.

§ V. *Du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques; principe général.*

28. Dans le frottement et autres modes employés pour exciter la puissance électrique, il y a non-seulement production de chaleur, mais souvent encore réaction chimique; c'est un motif pour nous occuper d'abord des phénomènes électriques qui ont lieu toutes les fois que les particules des corps réagissent les unes sur les autres.

La production de l'électricité dans les actions chimiques a été long-temps un sujet de controverse entre les physiciens, comme nous l'avons vu dans la notice historique; mais, depuis la découverte d'OErsted, on a des moyens tels, pour résoudre cette question, qu'on a pu rassembler un grand nombre de faits si concluants, qu'il n'est plus possible maintenant d'élever le moindre doute sur l'émission de l'électricité, dans les combinaisons et les décompositions chimiques.

Lorsque l'on plonge, l'un après l'autre, dans de l'acide nitrique, les deux bouts du fil de cuivre d'un multiplicateur, on a un courant électrique, dont l'action sur l'aiguille aimantée indique que le bout plongé le premier prend à l'autre l'électricité positive. Cet effet peut être attri-

bué à une différence dans les réactions chimiques, ou bien à une différence dans les températures des deux bouts qui sont inégalement attaqués, le bout plongé le dernier étant le plus attaqué, et celui dont la température est par conséquent la plus élevée. Ce ne sont pas là encore toutes les causes qui concourent à l'effet général; nous y reviendrons dans un instant. Pour décider l'alternative, nous devons rechercher ce qui arrive quand on plonge dans un liquide conducteur de l'électricité les deux bouts d'un fil de métal, non attaqué par ce liquide, et n'ayant pas la même température. Prenons encore de l'acide nitrique et deux bouts d'un même fil de platine ou d'or, mis en communication avec le multiplicateur, et dont les surfaces soient parfaitement nettes. En général, il n'y aura aucun trouble dans l'équilibre des forces électriques à égalité de température; mais si l'on retire l'un des bouts pour élever sa température, et qu'on le plonge ensuite dans l'acide, on a un courant qui va du bout froid au bout chaud, c'est-à-dire que le premier prend au liquide l'électricité négative. En comparant ce résultat à celui de l'expérience précédente, on trouve que si la cause du phénomène, c'est-à-dire la chaleur, était la même dans les deux cas, le courant, dans le premier, aurait dû être dirigé dans une direction contraire, puisque le bout plongé le dernier, qui est le plus attaqué et celui dont la température est la plus élevée, aurait dû prendre l'électricité positive, au lieu de l'électricité négative. Dès lors nous sommes obligés de reconnaître encore l'existence d'effets électriques dans les actions chimiques. Le principe étant posé, nous allons en suivre les conséquences dans tous les cas où les particules des corps se séparent pour se combiner avec d'autres. Reprenons l'appareil où les deux bouts d'un fil d'or plongent dans de l'acide nitrique pur.

Si l'on ajoute une très-petite quantité d'acide hydrochlorique, près de la partie immergée d'un des deux fils, afin de former de l'eau régale, l'aiguille aimantée annonce aussitôt, par sa déviation, l'existence d'un cou-

rant électrique. Le bout attaqué prend l'électricité négative, et l'autre bout, ou l'acide, l'électricité positive. En remplaçant l'un des fils d'or par un fil de platine, les effets sont les mêmes, c'est-à-dire qu'il n'y a production de courant que par l'addition de l'acide hydrochlorique; le bout attaqué prend encore l'électricité négative. Ce résultat nous indique que, lorsque les deux bouts d'un fil composé de deux autres fils de métal différent, soudés par une de leurs extrémités, plongent dans un liquide qui n'attaque ni l'un ni l'autre, il ne se dégage pas d'électricité; mais que dès l'instant que l'un des deux métaux est attaqué, celui qui l'est le plus prend l'électricité négative. Ce principe, comme nous allons le voir, peut être traduit ainsi : quand un corps se combine avec un autre, celui qui joue le rôle d'acide prend l'électricité positive, et celui qui se comporte comme alcali, l'électricité négative.

Si l'on veut éviter le contact immédiat des deux métaux, on opère de la manière suivante : une lame d'or enveloppée de papier joseph est fixée entre les deux branches d'une pince de platine qui communique à l'un des bouts du fil d'un multiplicateur à long circuit; on la plonge dans une capsule de porcelaine remplie d'acide nitrique, mis également en rapport avec le même appareil, au moyen d'une lame de platine communiquant avec l'autre bout du fil. Les effets sont nuls; mais si l'on ajoute une goutte d'acide hydrochlorique, l'or est attaqué, et la déviation de l'aiguille aimantée annonce qu'il a pris, comme ci-dessus, l'électricité négative.

Cette méthode d'expérimentation sert également pour tous les autres métaux. Mais il ne faut pas perdre de vue un instant, dans l'analyse des effets électro-chimiques, le mode d'action du liquide sur le métal. Quand on plonge, par exemple, dans l'acide nitrique, deux lames de cuivre, en communication avec le multiplicateur, le courant change souvent plusieurs fois de direction, pour peu que l'on déplace les lames. On ne peut se rendre compte de cette anomalie qu'en analy-

sant tous les effets électriques qui ont lieu pendant l'action d'un acide sur un métal et dont nous allons parler.

§ VI. *Effets électriques produits dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres.*

29. Quand un métal est attaqué par un acide ou un liquide quelconque, il y a dégagement de chaleur, puis formation d'un composé qui exerce une réaction, non-seulement sur ce métal, mais encore sur le liquide qui l'environne, et avec lequel il se mêle insensiblement; quatre causes qui produisent de l'électricité. L'action des dissolutions neutres, acides et alcalines, les unes sur les autres, étant souvent une des causes prépondérantes, nous en parlerons d'abord. Pour observer les effets électriques qui ont lieu dans la combinaison d'un acide avec un alcali, l'un et l'autre à l'état liquide, on prend quatre capsules que l'on range sur une même ligne (fig. 40.) Les deux capsules extrêmes sont en platine, et les deux du milieu en porcelaine. On verse de l'acide nitrique dans les deux premières et la dernière, et une dissolution alcaline dans la troisième; puis on fait communiquer la première et la deuxième, la troisième et la quatrième, avec des tubes recourbés remplis d'eau, et la deuxième et la troisième avec une mèche d'asbeste. Si, dans chacune des deux capsules extrêmes, on plonge une lame de platine communiquant avec l'un des bouts du fil qui forme le circuit d'un multiplicateur très-sensible à fil long, il y a aussitôt production d'un courant, dont le sens indique que l'acide a pris à l'alcali l'électricité positive. Que se passe-t-il dans cette expérience? Aux deux extrémités tout est semblable, puisque de chaque côté le platine est en contact avec de l'acide nitrique. Il y a action chimique entre l'acide de la deuxième capsule et l'alcali qui est dans la troisième; l'eau du tube qui sert à établir la communication de la troisième avec la quatrième exerce deux actions différentes, l'une sur l'acide et l'autre sur l'alcali; il y a donc en tout trois ac-

tions chimiques qui concourent à la production des effets électriques observés. Or comme la première, celle de l'acide sur l'alcali, est la plus forte, on doit la considérer comme l'emportant sur les deux autres; on en conclut que, dans la combinaison d'un acide avec un alcali, l'acide prend l'électricité positive, et l'alcali l'électricité négative, conformément au principe que nous avons établi précédemment. Il arrive quelquefois qu'en opérant avec un morceau de potasse que l'on fixe à l'extrêmité d'une mèche d'asbeste, le courant chemine dans une direction opposée. Il en est de même avec quelques acides solides; mais il paraît qu'il se produit dans ce cas des effets thermo-électriques qui masquent les effets électro-chimiques.

On peut supprimer les deux capsules du milieu, et placer les deux autres à un décimètre de distance l'une de l'autre (fig. 41), en les faisant toujours communiquer avec une mèche de coton imbibée d'eau, qui, en raison de sa longueur et de la différence de poids spécifique des deux liquides, s'oppose long-temps à la réunion des deux acides. Vers le milieu de cette mèche, on verse doucement avec un tube une goutte de chacun des deux liquides dont on veut connaître l'effet électrique, au moment du contact; le courant fait alors connaître et la nature et l'intensité de cette réaction En soumettant à l'expérience différents liquides, on trouve les résultats suivants:

L'acide nitrique est positif avec......	l'acide hydrochlorique. ——— acétique. ——— nitreux. les dissolutions alcalines. les dissolutions de nitrate. ——————— de sulfates. ——————— d'hydrochlorates, etc., etc.
L'acide nitrique est négatif avec.....	l'acide sulfurique. l'acide phosphorique, etc.

L'acide phosphorique est positif avec...	l'acide hydrochlorique. l'acide sulfurique. l'acide nitrique. les dissolutions alcalines, salines, etc., etc.

On voit que l'acide phosphorique est le plus électro-positif de tous ces liquides. Nous ignorons d'où peut provenir cette propriété.

Le contact de l'acide nitrique avec la dissolution de nitrate de cuivre, et, en général, celui d'un acide avec une de ses dissolutions, étant suivi d'une dissolution, on peut en conclure que ce mode d'action, relativement aux phénomènes électriques, est analogue à la combinaison.

Différentes méthodes peuvent être employées pour observer les effets électriques qui sont produits dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres; je citerai encore les deux suivantes :

3o. On prend deux capsules de porcelaine, d'égale dimension; on remplit l'une d'une dissolution de potasse ou de soude, et l'autre d'acide nitrique. Les deux liquides sont joints ensemble par une lame de platine; puis l'on plonge dans chaque capsule l'un des bouts d'un fil de platine en communication avec le multiplicateur; il n'y a aucun dérangement dans l'équilibre des forces électriques, puisque, dans le cas où il y aurait une action quelconque de la part des liquides sur le platine, les effets, étant égaux et dirigés en sens inverse, se détruiraient. Mais il n'en est plus de même quand on pose sur la lame intermédiaire une mèche d'amiante, pour mettre en communication les deux dissolutions; on retrouve alors les effets indiqués plus haut.

La seconde méthode consiste à prendre une cuiller de platine, et une lame de même métal que l'on met en communication avec le fil du multiplicateur. La première est destinée à recevoir une des dissolutions, et l'autre à être plongée dedans, après avoir été mise préalablement en contact avec l'autre dissolution. Cette méthode est plus simple; mais elle n'est pas à l'abri des

objections des physiciens, qui admettent des effets électriques de contact, indépendamment des réactions chimiques. On a aussitôt un courant qui annonce que l'acide, en réagissant sur l'alcali, a pris l'électricité positive.

Toutes les fois que l'on veut observer les effets électriques qui ont lieu dans les actions chimiques, il faut avoir l'attention de s'assurer préalablement si le contact des lames de platine et des dissolutions ne donne pas lieu à des effets électriques passagers résultant de la réaction, sur ces dissolutions, des corps étrangers qui adhèrent presque toujours à leurs surfaces. Ces effets ont induit souvent en erreur les observateurs, qui sont partis de là pour annoncer des résultats faux. Pour s'en préserver, il faut laver les vases et lames de platine dans de l'acide nitrique, puis dans l'eau distillée, les faire rougir ensuite, et enfin les mettre en contact pendant quelque temps avec les dissolutions, avant de commencer l'expérience.

Il y a encore une autre cause d'erreur qui trouble les résultats, et dont je dois faire mention ici avant d'en donner l'explication. Dans l'appareil (fig. 41), quand on fait naître, par suite des réactions qui ont lieu sur la mèche d'amiante, un courant, dont le sens est indiqué par la flèche, si l'on remplace la mèche par une lame de platine, il se produit immédiatement après un autre courant dirigé en sens inverse du premier, par suite des modifications qu'acquiert la surface des lames de platine. Ce courant secondaire est d'autant plus sensible que l'appareil est plus délicat.

31. Nous avons encore à examiner l'action des acides et des alcalis sur l'eau, et des dissolutions neutres les unes sur les autres. Si l'acide est solide, on en fixe un morceau entre les branches de la pince de platine; et on le plonge dans l'eau que renferme la cuiller, s'il est liquide, on plonge dedans une éponge de platine en communication avec le multiplicateur; on la retire pour la replonger dans la cuiller de platine, remplie d'eau distillée. On a d'abord un courant faible, qui va de l'eau à l'acide, et qui augmente d'intensité à mesure que

l'eau se charge davantage d'acide; à un certain point, il diminue, et devient nul quand la combinaison est entièrement effectuée. Nous voyons donc que l'eau, dans sa combinaison avec les acides, se comporte, sous le rapport des effets électriques, comme les alcalis dans leur combinaison avec les acides.

On observe de la même manière les effets électriques produits dans la dissolution des alcalis dans l'eau : le courant va de l'alcali à l'eau; résultat qui pouvait être prévu, puisque l'on sait que l'eau joue le rôle d'acide par rapport à ce corps.

Les sels neutres, en se dissolvant, donnent en général des effets peu marqués, qui indiquent cependant que la solution la plus saturée joue le rôle d'acide par rapport à celle qui ne l'est pas; mais pour peu qu'ils soient acides ou alcalins, les effets rentrent dans ceux qui ont lieu dans la dissolution des acides et des alcalis dans l'eau.

Les doubles décompositions de sels neutres s'opèrent sans dégagement d'électricité. Rien n'est plus facile que de le démontrer. On prend deux capsules de porcelaine renfermant, l'une, une dissolution de nitrate de baryte, et l'autre, une dissolution de sulfate de potasse, et on les met en rapport avec le multiplicateur au moyen de lames de platine plongeant dedans; puis on établit la communication entre les deux dissolutions avec une mèche de coton; la double décomposition s'opère alors sans dégagement sensible d'électricité, puisque l'aiguille aimantée n'est pas déviée de sa position. Ce résultat est facile à expliquer, je ne m'y arrêterai donc pas.

§ VII. *Des effets électriques produits dans la réaction des métaux sur les acides ou les dissolutions salines.*

35. Les réactions des dissolutions entre elles et sur les acides sont des causes qui influent beaucoup sur les effets électriques qui se manifestent dans l'action d'un acide sur un métal. Soient deux capsules A et A′ remplies d'acide nitrique et communiquant ensemble avec une mèche d'amiante, si l'on plonge dans chacune d'elles l'un des

bouts d'une lame d'or, dont l'autre est fixé à l'une des extrémités du fil d'un galvanomètre, et que l'on verse dans la capsule A quelques gouttes d'hydro-chlorate d'or, près de la lame, l'aiguille aimantée éprouve une déviation, qui va jusqu'à 80°, dans un sens tel que le bout A devient négatif par rapport au liquide; mais si, au lieu de la dissolution, on verse quelques gouttes d'acide hydrochlorique, l'or est attaqué aussitôt, il y a formation d'hydro-chlorate d'or et production d'effets électriques absolument semblables aux précédents, tant pour la direction que pour l'intensité; et, comme dans ces deux cas, il y a réaction de l'hydro-chlorate d'or sur l'acide nitrique, laquelle rend l'acide positif, comme dans l'action chimique du métal sur l'acide, on ne peut douter que la première n'exerce une certaine influence sur les effets électriques. Cette expérience montre combien il est difficile de déterminer immédiatement le dégagement de l'électricité dans l'acte même de la combinaison d'un métal avec un acide, abstraction faite de la réaction de la dissolution qui se forme sur le liquide qui l'environne. On peut cependant y parvenir en opérant de la manière suivante:

On remplit deux capsules A et A' d'une dissolution de nitrate de cuivre, que l'on met en communication comme ci-dessus avec une mèche de coton, et l'on plonge dans chacune d'elles le bout d'une lame de cuivre parfaitement décapée, dont l'autre communique avec le multiplicateur; il ne se produit aucun effet électrique; mais si l'on ajoute une goutte d'acide nitrique au liquide de la capsule A, le bout qui plonge dedans devient négatif. Dans ce cas, on a bien l'effet électrique qui résulte de l'action du métal sur l'acide, car celui qui est produit par la réaction de la dissolution qui se forme, sur la dissolution environnante, est très-faible et même nul.

36. L'étain et son sulfate, le fer et son hydro-chlorate, le plomb, l'antimoine et le bismuth avec leurs dissolutions respectives, agissent de même que le cuivre par rapport à ses dissolutions, quand on ajoute quelques

gouttes d'acide. Il en est encore de même du zinc, du fer et probablement du manganèse, avec les dissolutions de leurs nitrates respectifs: le métal s'empare donc de l'électricité négative conformément au principe général; mais avec les dissolutions de leurs sulfates, les effets sont inverses, c'est-à-dire que le bout du métal qui plonge dans la capsule où l'on verse quelques gouttes d'acide sulfurique, devient positif, et cela quelque petite que soit la quantité d'acide. Ce fait, qui est particulier aux métaux décomposant l'eau, mérite d'être signalé.

§ VIII. *Effets électriques produits dans la réaction de deux métaux différents sur un ou plusieurs liquides.*

37. Le cas le plus simple est celui où chaque métal plonge dans une capsule remplie du même liquide, la communication étant établie entre les deux capsules au moyen d'une mèche de coton ou d'amiante. On prend deux lames, l'une de cuivre et l'autre de zinc, qui communiquent chacune avec l'un des bouts du fil d'un multiplicateur, et pour liquide commun une dissolution saturée de sulfate de zinc. A l'instant de l'immersion, le cuivre prend au liquide l'électricité positive, et le zinc l'électricité négative. L'effet, abstraction faite des phénomènes que quelques physiciens admettent au contact de deux métaux, doit être attribué en grande partie à ce que le zinc est plus attaqué que le cuivre. Supposons que la déviation de l'aiguille aimantée soit de 62°, si l'on ajoute quelques gouttes d'acide nitrique, ou de nitrate de cuivre, dans la capsule où se trouve la lame de cuivre, là où était l'action chimique la moins forte, l'aiguille aimantée, au lieu de rétrograder, se porte à 86° et reste stationnaire pendant quelque temps. Ce résultat est encore conforme à ce que nous avons vu précédemment, puisque le nitrate de cuivre étant positif par rapport au sulfate de zinc, l'effet doit augmenter, si le courant qui a lieu dans l'action de l'acide nitrique sur le cuivre est le plus faible; la même quantité d'acide mise dans l'autre capsule diminue sensiblement l'intensité du

courant. Les acides sulfurique et hydro-chlorique agissent de même. Continuons toujours à prendre des dissolutions saturées de sels métalliques, qui n'éprouvent aucune action sensible de la part du métal qu'on y plonge; versons en conséquence dans la capsule où se trouve la lame de cuivre, une dissolution saturée de nitrate de cuivre, et dans l'autre une dissolution saturée de sulfate de zinc, et opérons dans les mêmes circonstances que précédemment, pour que les résultats soient comparables. La déviation est alors de 88° et n'éprouve de diminution que lentement. L'accroissement d'effet est dû, dans ce cas, à la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre : au surplus, l'action chimique de chaque métal sur la dissolution dans laquelle il se trouve, est assez faible pour que l'on ne doive pas la regarder comme la cause unique du phénomène. Une addition d'acide nitrique à la dissolution du nitrate ne modifie pas sensiblement l'intensité du courant. Il en est de même quand on verse une goutte d'acide sulfurique dans l'autre capsule, si la lame de zinc a été décapée préalablement. Voilà donc un maximum d'effets qui indique que la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre a eu la plus grande part à la production du courant. C'est tellement là la cause principale du phénomène, que si l'on opère avec deux lames de cuivre ou de platine, les effets ont lieu dans le même sens, à l'intensité près, qui varie en raison de la difficulté plus ou moins grande qu'éprouve le fluide électrique à passer du liquide dans le métal.

38. Considérons le cas où les deux capsules ne contiennent que de l'eau avec un cinquantième d'acide sulfurique. L'aiguille aimantée éprouve, dans le même sens, une déviation de 80 degrés, qui est due en partie à l'action de l'eau acidulée sur le zinc. Une addition de sulfate de zinc du côté zinc ne modifie pas le courant, tandis que quelques gouttes de nitrate de cuivre ou d'acide nitrique de l'autre côté l'augmentent d'une manière assez forte. Ce dernier effet est dû à la réaction des li-

quides ; car le nitrate de cuivre étant positif par rapport au sulfate de zinc, l'intensité du courant doit augmenter. L'acide nitrique ajouté du côté zinc diminue la déviation de 84 à 80 degrés ; résultat qui était facile à prévoir, puisque le nitrate de cuivre qui se forme est positif par rapport au sulfate de zinc.

§ IX. *Effets électriques produits dans la combustion.*

39. Le principe relatif au dégagement de l'électricité dans les combinaisons va trouver son application dans la combustion : l'oxigène prend l'électricité positive, et le combustible l'électricité négative.

Voyons ce qui se passe dans la combustion du charbon. M. Pouillet, à qui est due cette expérience, prend un cylindre de charbon d'un assez gros diamètre, et le place verticalement à quelques centimètres au-dessous du plateau inférieur du condensateur. Ayant fait communiquer le charbon avec le sol, il l'allume à sa partie supérieure. Une colonne de gaz acide carbonique s'élève aussitôt, et transmet au plateau inférieur un excès d'électricité positive. Si l'on veut recueillir l'électricité négative du charbon, on le pose par sa base sur le plateau supérieur, et on soutient le feu par un léger courant d'air, afin d'enlever plus promptement le gaz chargé d'électricité positive.

M. Pouillet a cherché également ce qui se passe dans la combinaison des gaz, particulièrement dans celle de l'hydrogène avec l'oxigène. Le gaz hydrogène s'écoule par un tube de verre vertical, et il recueille l'électricité au moyen d'une spirale en platine, dont les circonvolutions ont un diamètre assez grand pour envelopper la flamme sans la toucher : on obtient alors des signes bien sensibles d'électricité positive. Quand la flamme touche la spire, les signes d'électricité sont à peine sensibles. Pour recueillir l'électricité de la flamme, il prend une spire à petit diamètre qu'il plonge dans l'intérieur ; il la trouve négative. Il tire la conséquence de ces deux résultats, que le dedans et l'extérieur de la flamme possèdent une électricité contraire.

Dans le cas où l'hydrogène sort par un tube de métal qui communique avec le condensateur, celui-ci prend toujours un excès d'électricité négative; si on le fait communiquer au contraire avec le sol, il perd l'électricité négative, et le produit de la combustion conserve un excès d'électricité positive; ainsi, dans la combustion, les molécules d'oxigène qui se combinent, dégagent de l'électricité positive, et le corps combustible de l'électricité négative.

40. Je suis loin de contester les résultats observés par M. Pouillet, mais il n'en est pas de même des conséquences qu'il en tire, attendu que l'appareil dont il a fait usage accuse également des effets électriques dus à une autre cause que la combustion. J'avais cherché aussi, avant ce physicien, à découvrir l'électricité qui se dégage dans la combustion du gaz hydrogène ou de l'alcool, au moyen de fils de platine qui plongent dans les flammes. J'annonçai avec réserve les premiers résultats que j'obtins, dans la crainte qu'ils ne fussent dus non seulement à l'électricité qui se dégage pendant la combustion du gaz, mais encore à quelque propriété particulière que les métaux acquièrent à certaine température (1).

Les expériences que nous avons rapportées sur les phénomènes qui se manifestent quand les deux bouts d'un fil de platine ne possèdent pas la même température, vont nous mettre à même d'expliquer une partie des effets qui ont lieu, quand on plonge une spirale de platine dans l'intérieur d'une flamme, ou qu'on la place extérieurement sans toucher la flamme. On sait que, lorsqu'un fil de platine est en communication par l'un de ses bouts avec l'un des plateaux d'un condensateur, si l'on plonge l'autre dans une des enveloppes d'une flamme produite par la combustion d'alcool renfermé dans un vase de cuivre que l'on tient à la main, le fil prend aussitôt un excès considérable d'électricité néga-

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. III, p. 329.

tive, que l'on ne doit pas attribuer entièrement à la combustion. En effet, aussitôt que le fil de platine a atteint la température rouge, si l'on retire la lampe et que l'on touche ensuite la partie la plus chaude avec une bande de papier humide, ou bien avec un tube de verre suffisamment chaud pour qu'il soit conducteur, l'effet est le même que lorsque le fil touchait à la flamme ou s'en trouvait à peu de distance. D'après cela, dans le cas présent, le dégagement de l'électricité est dû, en grande partie, à la différence de température entre les deux bouts. La flamme remplit les fonctions d'un corps conducteur; elle soutire l'électricité positive du fil, comme l'a fait la bande de papier ou le tube de verre. Ce qui confirme cette explication, c'est que l'effet est le même, soit que l'on fasse rougir le fil dans la flamme intérieure ou à peu de distance de son enveloppe extérieure. Nous n'en admettons pas moins avec M. Pouillet, que, pendant la combustion de l'alcool ou de l'hydrogène, toute la partie de la flamme qui est en contact avec l'oxigène doit prendre l'électricité négative, tandis que l'oxigène et l'acide carbonique s'emparent de l'électricité contraire : ces effets sont la conséquence d'un principe général; seulement nous ferons observer que l'emploi des spirales ou des fils de platine que l'on plonge dans les flammes donne des effets composés, contre lesquels on doit se tenir en garde.

§ X. *Des effets électriques produits dans les décompositions chimiques.*

41. M. Pouillet, en recherchant les causes d'où émane l'électricité atmosphérique, a été conduit à examiner ce qui arrive pendant l'évaporation de l'eau pure, ou renfermant des substances en dissolution, contenue dans des vases de platine ou d'un métal qui peut être attaqué. Cette question avait déja attiré l'attention de de Saussure, de Lavoisier et de Laplace, comme nous l'avons vu dans la notice. Les résultats auxquels sont parvenus ces illustres physiciens ne pouvaient les conduire à la

vérité, car ils ignoraient que les moindres changements chimiques donnent lieu à des effets électriques ; aussi attribuèrent-ils à des changements dans l'état moléculaire des corps ce qui devait être rapporté à la combinaison de ces mêmes corps avec d'autres éléments.

Pour observer les effets électriques produits dans les décompositions, on se sert de deux procédés. Le premier consiste à placer sur un disque de métal, fixé à l'un des bouts d'une tige horizontale, qui est soudée par l'autre bout au plateau inférieur d'un condensateur, un creuset de platine préalablement chauffé, dans lequel on verse le liquide sur lequel l'on veut opérer. Le second exige l'emploi de fortes lentilles avec lesquelles on élève la température. Les substances à décomposer sont placées sur une plaque de platine, qui communique également avec le plateau inférieur du condensateur.

Le creuset de platine étant chauffé au rouge, si l'on jette dedans quelques gouttes d'eau distillée, on n'obtient aucun signe d'électricité lorsque l'évaporation commence; ce résultat est dû à M. Pouillet. Les acides sulfurique, nitrique et acétique se comportent à cet égard comme l'eau. Quand l'eau renferme de la strontiane ou d'autres bases, la capsule se charge d'un fort excès d'électricité positive; la vapeur d'eau prend l'électricité négative. Avec l'ammoniaque étendue d'eau, les effets sont inverses. M. Pouillet a fait observer avec raison que l'ammoniaque se vaporisant plus facilement que l'eau, emporte avec elle l'électricité positive, et laisse à l'eau et par suite à la capsule l'électricité négative. Les sels solubles donnent également de l'électricité négative au creuset. En opérant avec un creuset de fer et de l'eau distillée, le premier prend toujours de l'électricité négative, parce que le fer en s'oxidant s'empare toujours de cette électricité.

Quand l'eau renferme un acide, l'effet est le même; mais son intensité varie en raison de l'énergie avec laquelle s'exerce l'action chimique; nous en verrons plus loin la cause. Des creusets de différents métaux donnent

des résultats semblables. Il résulte de ces diverses observations, qu'il ne se dégage jamais d'électricité quand l'eau change d'état, si ce n'est dans le cas où elle tient des corps quelconques en dissolution ; l'effet qui est alors produit est dû à une action chimique, à la décomposition des corps qui se trouvent dissous dans l'eau, ou à la séparation des molécules de l'eau d'avec celles des éléments des corps qu'elle tient en dissolution. Les bases retiennent l'électricité positive et les acides l'électricité contraire; résultat inverse de celui que donnent les combinaisons.

Il est donc bien prouvé que les effets électriques qui ont lieu dans les décompositions, sont inverses de ceux qui se manifestent dans les combinaisons.

42. Rien n'est plus simple maintenant que d'expliquer les résultats souvent contradictoires qui ont été obtenus par de Saussure, Lavoisier et Laplace. Le premier ayant pris un grand creuset de fer, le fit rougir, et, après l'avoir isolé, il projeta dedans successivement diverses petites quantités d'eau ; chaque projection refroidissant de plus en plus le creuset, il arriva à un terme où il n'y avait plus que la chaleur nécessaire pour faire bouillir l'eau; l'électricité prise par celle-ci fut constamment positive. Nous savons maintenant que cette électricité est celle que prend l'hydrogène dans la décomposition de l'eau.

De Saussure trouva qu'en projetant une petite quantité d'eau dans le creuset, à l'instant où il sortait du feu et quand il était encore d'un rouge tirant sur le blanc, il n'y avait ordinairement aucun dégagement d'électricité; mais ensuite, il se produisait tantôt une électricité, tantôt l'autre, et par conséquent il devait arriver des cas où il ne se dégageait pas d'électricité. Il opéra ensuite avec une tasse de porcelaine blanche, qu'il avait entourée de sable dans un creuset d'argile. Il la fit chauffer jusqu'au blanc, ayant projeté dedans de l'eau ; il trouva que l'électricité avait été constamment négative. Tous ces effets s'expliquent parfaitement, en

analysant les réactions chimiques qui ont lieu dans ces divers cas.

L'alcool dans un creuset d'argent lui donna de l'électricité négative, ainsi que l'éther. Il fit une autre expérience : ayant pris une grenade d'*argent*, et, après l'avoir fait chauffer fortement, il y injecta de l'eau distillée. A l'instant où il versa les premières gouttes, il sortit par l'ouverture un jet de flammes vives et brillantes; tant que dura la flamme il ne se dégagea pas d'électricité; mais elle se montra aussitôt que la flamme eut cessé. La flamme est la conséquence de la décomposition de l'eau; et il n'est pas étonnant qu'il y ait eu dégagement de l'électricité lorsque l'action chimique est devenue moins vive, parce que la recomposition des deux électricités s'opère moins facilement.

43. Lavoisier et Laplace, dans leurs recherches sur l'électricité que laissent échapper les corps qui se réduisent en vapeur (1), employèrent deux sortes d'appareils, disposés de manière que les corps d'où s'élevaient les vapeurs ou qui se convertissaient en vapeurs, étaient isolés et communiquaient à un électroscope ordinaire, ou à l'électroscope condensateur de Volta. Ils mirent d'abord dans un bocal à large ouverture de la limaille de fer, et ils versèrent dessus de l'acide sulfurique étendu d'environ de trois parties d'eau. Il y eut une vive effervescence, un dégagement rapide de gaz hydrogène, et au bout de quelques minutes le condensateur fut chargé assez fortement pour donner une étincelle. L'électricité fut reconnue être négative. Dans cette expérience, il y a encore des phénomènes composés, oxidation du fer aux dépens de l'oxigène de l'eau, dégagement hydrogène, formation de sulfate de fer, trois causes qui donnent lieu à des effets électriques différents. Mais comme le dégagement de gaz hydrogène était considérable, il devait emporter avec lui l'électricité positive, et laisser au vase l'électricité négative.

---

(1) **Mémoires. de l'Acad. des Sciences, année 1782.**

En versant de l'acide sulfurique sur de la craie en poudre, ils trouvèrent également que le vase avait pris l'électricité négative, mais en moins grande quantité que dans l'expérience précédente. Il en a été de même dans la formation du gaz nitreux. L'eau, en se vaporisant, devait emporter avec elle l'électricité négative de l'acide.

Ces exemples montrent avec quelle facilité on explique maintenant les effets électriques, que l'on attribuait jadis à la vaporisation de l'eau dans des vases de différents métaux.

§ XI. *Des effets électriques produits dans la décomposition de l'eau oxigénée par divers corps.*

44. La décomposition de l'eau oxigénée ou peroxide d'hydrogène par le contact d'un grand nombre de corps, donne naissance à des phénomènes électriques analogues à ceux que l'on observe dans les actions chimiques. Les métaux, à l'exception du fer, de l'étain, de l'antimoine et du tellure, tendent tous à opérer cette décomposition; les plus oxidables s'oxident et donnent lieu en même temps à un dégagement d'oxigène, tandis que ceux qui ne le sont pas conservent leur éclat métallique. Un grand nombre de corps jouissent également de la propriété de décomposer l'eau oxigénée.

Des métaux qui décomposent le peroxide d'hydrogène sans s'altérer.

45. On peut soumettre ces corps de deux manières à l'expérience : la première, qui donne les effets électriques les plus marqués, consiste à former des éponges métalliques dans le genre de celles que l'on obtient avec l'hydro-chlorate-ammoniaco de platine chauffé au rouge. Prenons d'abord le platine. On fixe une petite cuiller de ce métal à l'une des extrémités du fil d'un galvanomètre très-sensible, et à l'autre une éponge aussi en platine. Dans la cuiller on verse de l'eau renfermant

sept à huit fois son volume d'oxigène, et on y plonge l'éponge; au même instant il y a autour d'elle une effervescence produite par le dégagement de l'oxigène, puis un courant électrique qui va de l'éponge à l'eau oxigénée, comme si le métal était attaqué. Ce courant provient uniquement de la décomposition de l'eau oxigénée; car si la chaleur, qui se dégage pendant sa décomposition, était la cause du courant, l'éponge qui s'échauffe davantage devrait prendre l'électricité positive, tandis que c'est le contraire qui a lieu. Ainsi, nul doute que la décomposition de l'eau oxigénée par l'éponge de platine ne produise des effets électriques analogues à ceux que l'on observe dans les combinaisons.

46. Pour opérer avec l'éponge d'or, on prépare d'abord celle-ci sur du charbon, ou dans un tube de verre où l'on a mis une certaine quantité d'or très-divisée obtenue par le sulfate de fer; puis on élève la température modérément pour que les parties puissent adhérer ensemble, et former une masse suffisamment solide pour être fixée à l'un des bouts du fil du multiplicateur, tandis que l'autre communique à une petite cuiller d'or : l'effet est le même avec cette éponge qu'avec l'autre. On peut observer les mêmes effets en fixant à l'un des bouts du fil une lame de métal sur la surface de laquelle on répand des parties très-divisées du même métal, dont on élève la température pour les y faire adhérer; on verse ensuite dessus de l'eau oxigénée, et l'on touche le liquide avec une lame du même métal attachée à l'autre bout du fil.

Des métaux qui décomposent le peroxide d'hydrogène, en absorbant une partie de son oxigène et dégageant l'autre.

47. Les phénomènes électriques qui se manifestent quand on met en contact le peroxide d'hydrogène avec un métal capable d'absorber une portion de son oxigène et de laisser dégager l'autre, proviennent évidemment de

deux causes : 1° de la décomposition du peroxide; 2° de l'oxidation du métal. Le courant électrique que l'on obtient alors est donc la somme ou la différence des deux courants partiels, selon qu'ils vont dans le même sens ou dans un sens différent; mais comme les courants relatifs à l'oxidation varient souvent, sans qu'on puisse en connaître au juste la cause, nous préférons ne pas nous étendre davantage sur ces phénomènes. Nous ferons observer seulement que, la plupart du temps, le sens du courant est le même que pour les métaux qui ne s'oxident pas.

Action des oxides en général sur l'eau oxigénée.

48. Les effets électriques qui ont lieu dans l'action de l'eau oxigénée sur les oxides, soit que ces oxides se réduisent, se suroxident, ou restent dans le même état, sont toujours dirigés dans le même sens.

Prenons l'oxide d'argent, dont la réduction est très-facile. On répand cet oxide sur une bande de papier joseph, humectée suffisamment pour qu'il y adhère, et on la place sur une lame de platine, communiquant à l'une des extrémités du fil d'un multiplicateur. On plonge ensuite le papier dans une petite cuiller de platine renfermant de l'eau oxigénée et communiquant aussi avec le multiplicateur : il se manifeste aussitôt un courant électrique qui va de l'eau oxigénée à l'oxide. Ce courant, comme on voit, suit une direction opposée à celui que l'on observe dans le contact du peroxide d'hydrogène avec un métal.

On peut interpréter ainsi ce résultat : lorsqu'on met en contact l'oxide d'argent avec l'eau oxigénée, il se produit deux phénomènes, réduction de l'oxide et décomposition de l'eau oxigénée. Ces deux phénomènes donnent lieu chacun à un courant dirigé en sens contraire : en effet, le courant qui provient de la réduction de l'oxide doit aller de l'eau oxigénée à l'oxide, attendu que l'argent, par suite du dégagement de l'oxi-

gène qui était combiné avec lui, reprend aux corps environnants l'électricité positive; l'eau oxigénée se comporte d'une manière opposée pendant la décomposition: voilà donc deux effets contraires, qui tendent à se détruire l'un l'autre; c'est l'expérience seule qui peut déterminer celui des deux courants qui l'emporte sur l'autre.

La potasse se comporte comme l'oxide d'argent dans son action sur le peroxide d'hydrogène. Pour le démontrer, on prend un fragment de potasse caustique que l'on enveloppe à moitié de papier joseph, et que l'on fixe entre les branches d'une pince d'or; ensuite on opère comme ci-dessus. A peine la potasse a-t-elle touché l'eau oxigénée, qu'il se manifeste un courant électrique qui va de la potasse au liquide.

Or, pendant cette action, il s'opère encore deux choses : dissolution de la potasse dans l'eau, décomposition prompte du peroxide d'hydrogène. Il y a donc aussi deux courants qui s'ajoutent ou se retranchent, selon qu'ils vont dans le même sens ou dans deux sens différents. Les phénomènes électro-dynamiques sont ici bien marqués.

On ne saurait trop se mettre en garde, dans ces expériences, contre les effets thermo-électriques produits quand les lames de platine s'échauffent ; ce qu'il y a de mieux à faire, est de placer les corps destinés à décomposer l'eau oxigénée, sur l'un des bouts d'une bande de papier joseph, dont l'autre est appliqué sur la lame de platine.

§ XII. *Effets électriques produits dans les actions capillaires.*

49. Les actions capillaires sont celles qui s'exercent au contact des solides et des liquides, ou des liquides entre eux, quand il n'y a pas de combinaison. La nature de la substance solide n'a aucune part dans la production de ces phénomènes, toutes les fois que le liquide mouille les parois; car la couche infiniment mince de liquide

qui s'attache, par exemple, aux parois d'un tube, forme un autre tube intérieur qui agit seul sur le liquide pour le soulever : c'est à l'instant où cette couche se dépose qu'il peut se dégager de l'électricité, puisque les molécules sont ébranlées.

Pour observer les effets électriques qui se manifestent dans les phénomènes capillaires, on prend une cuiller en platine, que l'on fixe à l'un des bouts du fil d'un multiplicateur très-sensible, et une éponge de platine à l'autre; ces deux corps sont lavés préalablement et à plusieurs reprises dans de l'acide nitrique, afin d'enlever tous les corps étrangers adhérents aux surfaces, et dont la réaction sur les liquides donnerait lieu à des effets électriques particuliers. Ces précautions même ne suffisent pas toujours, et l'on est forcé quelquefois de laisser ces deux corps pendant plusieurs heures dans le même acide, pour détruire certaines facultés électriques qui troublent les phénomènes que l'on recherche. On remplit ensuite la cuiller d'acide nitrique pur et aussi concentré que possible, puis l'on plonge dedans l'éponge, que l'on a exposée préalablement à une chaleur rouge pour en chasser tout le liquide qu'elle renfermait. A l'instant où l'on effectue l'immersion, l'éponge prend au liquide l'électricité négative, comme si le platine avait été attaqué; elle se polarise aussitôt de manière à produire un courant en sens contraire, qui continue pendant quelque temps, diminue et devient nul. Quand on opère avec de l'acide nitrique étendu de la moitié de son poids d'eau, le premier effet a lieu seul et dure quelques instants, et l'on n'observe plus alors de changement dans la direction du courant.

En opérant avec de l'acide hydro-chlorique concentré, les effets sont inverses, c'est-à-dire que l'éponge prend d'abord l'électricité positive, puis immédiatement après l'autre électricité. Tâchons maintenant d'expliquer ces différents résultats.

50. Dans toutes les actions capillaires, il se dégage de la chaleur; on peut donc croire que l'éponge, à l'instant

où elle absorbe l'acide nitrique, acquiert une élévation de température suffisante pour qu'il y ait production d'effets thermo-électriques, semblables à ceux que nous avons exposés précédemment. Mais il est facile de voir que la chaleur n'est pas ici la cause unique du phénomène : en effet, retirons l'éponge de la cuiller quand une nouvelle immersion ne donne plus d'effet, chauffons-la légèrement et replongeons-la dans l'acide; le courant, qui, dans ce cas, est bien thermo-électrique, va de l'acide à l'éponge, et persévère dans cette direction jusqu'à ce que l'équilibre de température se soit établi dans toutes les parties; la direction du courant, dans ce cas, est la même que celle du courant secondaire que l'on obtient avec l'acide nitrique concentré. Dès lors, le courant primitif ne peut être attribué qu'à une action qui s'exerce au contact de l'acide et du platine. Ce courant ne proviendrait-il pas par hasard d'une légère altération que le platine éprouverait au contact de l'acide? C'est ce que nous ignorons.

Le courant secondaire peut aussi avoir une autre origine; nous verrons, en traitant des propriétés des courants électriques, les facultés qu'acquièrent les lames de métal plongeant dans les liquides, à travers lesquels on fait passer des courants : ces lames jouissent de la propriété de reproduire un courant en sens inverse, quand le premier a cessé. Il pourrait se faire que celui qui provient de l'action capillaire donnât naissance aussi à un courant secondaire.

Au surplus, l'action capillaire, à l'instant où elle se manifeste, doit faire éprouver aux molécules des corps qui en sont l'objet un ébranlement, qui suffit pour rompre l'équilibre des forces électriques. Une preuve que les molécules de liquide ont éprouvé un déplacement, c'est que la constitution de la couche qui adhère aux solides n'est pas la même que celle de la masse entière; nous parlerons de ce fait, en traitant des décompositions chimiques par le moyen des forces électriques à petite tension.

51. Comment se fait-il que, lorsqu'on opère avec de

l'acide nitrique étendu, on n'ait qu'un seul courant, et que l'on en ait deux avec de l'acide nitrique concentré? Cette question est assez difficile à résoudre, à moins d'admettre que dans le dernier cas l'action capillaire ayant été plus vive que dans le premier, les effets électriques auront été assez forts pour polariser l'éponge. Dans les questions de la nature de celle qui nous occupe et dont la solution n'est pas toujours possible, ce que l'on peut faire de mieux est de présenter les explications avec une extrême circonspection, afin de ne pas donner comme des vérités ce qui n'est souvent qu'une conjecture; c'est la marche que nous avons suivie et que nous suivrons constamment.

§ XIII. *Du dégagement de l'électricité par pression.*

52. Jusqu'ici il n'a été question que de phénomènes électriques produits par la chaleur, par les réactions chimiques ou actions analogues, et la capillarité. Nous allons nous occuper actuellement des divers procédés mécaniques à l'aide desquels on parvient à exciter la puissance électrique dans les corps, et nous ne perdrons pas de vue les effets thermo-électriques et électro-chimiques ; c'est pour ce motif que nous les avons présentés en premier lieu.

La pression est le mode d'action le plus simple pour électriser un corps, attendu que le contact des molécules ne change pas de place comme dans le frottement.

Æpinus est le premier qui ait observé cette propriété, en pressant l'une contre l'autre deux lames de verre sans exciter de frottement latéral. Il trouva, en séparant ces deux lames, que chacune d'elles possédait une électricité contraire.

53. M. Libes a fait une suite intéressante d'expériences sur le dégagement de l'électricité par la pression (1).

(1) Nouv. Dict. de Phys., t. 1er, p. 328 et suiv.

Ayant posé sur un disque de bois recouvert de taffetas, enduit d'une couche de résine élastique, un disque de cuivre jaune isolé par un cylindre de verre fixé à son centre, et avec la précaution de ne lui faire éprouver aucun frottement, il trouva, en pressant légèrement le disque sur le taffetas gommé et le séparant ensuite, que le disque était chargé d'un excès assez considérable d'électricité négative. En passant avec frottement le disque sur le taffetas, l'effet produit était inverse. Un disque de cuivre et un disque d'argent ont donné les mêmes effets.

54. Haüy trouva plus tard qu'un cristal de spath d'Islande et quelques autres substances minérales jouissent de la propriété de devenir électriques par la simple pression entre les doigts; mais cette propriété n'est pas aussi restreinte que le croyait ce célèbre minéralogiste, puisqu'elle appartient à tous les corps, pourvu qu'ils soient isolés. Pour mettre en évidence ce fait, on forme, avec les substances que l'on veut éprouver, des petits disques d'une épaisseur de quelques millimètres, que l'on adapte à des manches parfaitement isolants; on prend ces manches dans chaque main, et l'on presse un instant les deux disques l'un contre l'autre; après les avoir retirés du contact, on les présente au disque de clinquant de l'électroscope de Coulomb, préalablement électrisé : on trouve alors que les deux corps possèdent chacun une électricité contraire, pourvu cependant que l'un d'eux soit rangé dans la classe des corps mauvais conducteurs. Avec deux disques isolés, l'un de liége, l'autre de caoutchouc, le premier prend un excès d'électricité positive, et l'autre un excès d'électricité négative.

55. Toutes les substances minérales cristallisées qui ont un aspect vitreux, telles que la chaux sulfatée, la chaux fluatée, la baryte sulfatée, prennent l'électricité positive quand elles sont pressées par le disque de liége.

Des fruits, tels que l'orange, comprimés par le disque de liége, lui communiquent au contraire un excès d'électricité positive. A mesure que le fruit se dessèche et

qu'il perd de son élasticité, la faculté d'électriser le liége diminue.

56. Plusieurs causes tendent à modifier le dégagement de l'électricité par pression : la première est le plus ou moins de conductibilité des corps. Si l'on emploie, par exemple, un disque de moelle de sureau et un disque de métal, il n'y a aucun effet de produit, et il en est encore de même toutes les fois que les deux substances pressées sont conductrices de l'électricité. Il paraît qu'à l'instant où l'on exerce la pression, il se forme un nouvel état d'équilibre entre les deux fluides qui composent le fluide électrique naturel des molécules en contact. L'électricité positive occupe une des surfaces de contact, et l'électricité négative l'autre. Tant que dure la pression, ces deux fluides sont neutralisés l'un par l'autre : ainsi ces deux fluides, malgré l'attraction réciproque de leurs molécules, malgré leur tendance à passer d'un corps dans l'autre, trouvent dans la pression une force qui neutralise ces deux actions. Quand les corps sont parfaits conducteurs, aussitôt qu'une diminution de pression a lieu, les deux fluides se recombinent instantanément, quelle que soit la vitesse de séparation; tandis que lorsque l'un des corps n'est pas bon conducteur, une diminution de pression n'entraîne pas immédiatement la recomposition des deux fluides dégagés : cette recomposition met plus ou moins de temps à s'effectuer, suivant le degré de conductibilité des deux corps pressés. L'expérience suivante va donner une idée de l'influence de la vitesse de séparation sur le développement de l'électricité. Pressez un disque de liége sur une orange, et retirez-le ensuite vivement, il emporte avec lui un excès d'électricité positive assez considérable; mais si on ne le retire que plus ou moins lentement, on trouve que la quantité d'électricité dégagée va en diminuant, et finit par être insensible quand la vitesse de séparation est très-faible.

La chaleur modifie les phénomènes de pression. Si l'on prend un bouchon de liége bien sec, et qu'on le

coupe par la moitié, avec un instrument tranchant, en pressant les deux parties séparées l'une contre l'autre, elles prennent chacune assez ordinairement un excès d'électricité contraire; mais il arrive aussi quelquefois qu'elles n'en ont acquis aucun. Si l'on élève alors la température d'un des deux disques de quelques degrés, celle de l'autre restant constante, on trouve que la partie chauffée prend à l'autre l'électricité négative. Deux morceaux de spath d'Islande, à la même température, ne sont pas électriques par pression; mais il suffit d'une différence très-légère pour leur donner cette faculté.

A température égale, les deux disques de liége ne doivent leurs facultés électriques de pression qu'à une différence dans l'état de leur surface : celle qui a le plus d'aspérités prend toujours l'électricité négative. L'état des surfaces, dans les corps mauvais conducteurs, influe aussi sur leur faculté conductrice; car le spath d'Islande, qui est rangé parmi les corps les plus mauvais conducteurs, puisqu'il conserve pendant des semaines entières l'électricité qu'on lui a communiquée, devient suffisamment bon conducteur quand on lui a enlevé son poli, pour qu'il soit nécessaire de l'isoler si l'on veut qu'il conserve son électricité. On voit donc que les aspérités déterminent non-seulement l'espèce d'électricité que doit prendre un corps mauvais conducteur, mais modifient encore sa conductibilité.

Loi du dégagement de l'électricité par pression.

57. Pour mesurer les effets électriques de pression, il faut un appareil qui permette de varier à volonté les causes qui influent sur leur production. Nous n'aurons égard pour le moment qu'à la variation d'une des causes influentes, la pression, en supposant toutes les autres constantes; car il serait impossible de distinguer, dans l'effet général, la part de chacune d'elles. En conséquence nous agirons sur des corps dont le poli, la

température et l'état hygrométrique seront sensiblement les mêmes. L'appareil suivant (fig. 42) remplit les conditions nécessaires. On prend une balance électrique que l'on place sur une planchette horizontale *gg*, recouverte d'une glace; cette planchette est suspendue, à l'aide de deux montants verticaux, à une traverse AA d'un fort châssis en bois AABB; la cloche *oo* de la balance est percée dans sa partie supérieure d'une ouverture *ii*, dans laquelle on fait passer un tube en cuivre qui descend dans son intérieur, et qui est maintenu sur la traverse horizontale par de fortes vis. A l'extrémité de ce tube, on fixe un appareil *cc*, composé de deux petits plans circulaires en cuivre qui peuvent se rapprocher ou s'éloigner au moyen de trois vis, et dont le plan inférieur est percé à son centre d'une ouverture de deux centimètres. C'est entre ces deux plans qu'on place le corps qui doit être soumis à la pression. Ce petit appareil communique au réservoir commun, par l'intermédiaire d'une chaîne métallique qui donne ainsi écoulement à l'électricité. Lorsque l'on veut élever la température du corps, on verse dans le tube de cuivre *bb* un liquide chaud.

On pratique aussi deux ouvertures dans la planchette : l'une, d'environ un décimètre de diamètre, pour l'usage intérieur de la balance, peut être fermée à volonté avec une capsule en verre dont le bord est revêtu d'une douille à vis : cette capsule est aussi destinée à recevoir les substances qui absorbent l'humidité de la cloche; l'autre ouverture *uu* sert à passer un petit tube en verre, recouvert d'un vernis à la gomme laque, et portant à son extrémité supérieure le corps qui doit presser celui qui est placé entre les deux plans circulaires; ensuite, quand on veut exercer la pression, on pose ce tube, au moyen d'un petit support, sur l'une des extrémités d'un fléau de balance, dont l'autre est disposée pour recevoir les poids nécessaires à la production de la pression. L'ouverture pratiquée dans la planchette est suffisamment grande pour que ces mouvements ne soient

pas gênés; de plus, afin d'empêcher la communication de l'air extérieur avec celui de la cage de la balance électrique, on fixe, au moyen d'un anneau, autour de l'ouverture, un cylindre en baudruche, au milieu duquel passe le petit tube, et dont les dimensions sont telles, que la peau légère dont il est formé ne gêne nullement les mouvements du petit tube. Le fléau de la balance se hausse et se baisse à volonté à l'aide d'une vis de pression; ensuite on dispose l'appareil de manière que le fléau soit dans une direction horizontale, lorsque les deux corps soumis à la pression ne font que se toucher. Les choses ainsi disposées, on exerce la pression; puis, pour séparer les corps, on se sert de deux ressorts disposés de manière à recevoir une tension déterminée. Les ressorts revenant à leur état primitif entraînent avec eux le fléau; les corps se trouvent donc sortir de la compression avec une vitesse égale à la tension du ressort. Le corps placé à l'extrémité du tube étant sorti de la compression, il faut pouvoir le présenter au disque de clinquant suivant sa plus grande surface : on y parvient en formant ce tube de deux pièces, et les réunissant au moyen d'une charnière à boulon (fig. 42 *bis*). Passant ensuite ce tube qui est plein dans un autre tant soit peu plus large, les deux parties se trouvent en ligne droite; veut-on présenter le corps au disque de clinquant, on retire un peu le petit tube de son enveloppe, et la partie supérieure trébuche aussitôt.

58. Le plus souvent l'excès d'électricité acquis par chacune des substances au sortir de la compression est très-faible : si l'on prenait par conséquent pour fil de torsion un fil d'argent, tel que Coulomb l'a employé dans sa balance, la répulsion serait peu sensible, et quelquefois même nulle; il faut donc le remplacer par un autre qui ait une force de torsion bien plus faible. Les fils de platine d'une grande finesse, tirés à la filière à la manière de Wollaston, remplissent parfaitement ce but; mais il faut avoir la précaution de choisir le degré de finesse convenable; car je me suis assuré que lorsque

ces fils ont atteint un certain degré de ténuité, la torsion d'un petit angle dérange assez l'état d'agrégation des molécules pour que celles-ci ne reprennent plus leur position primitive d'équilibre. Il en résulte que les oscillations d'un petit pendule horizontal suspendu à l'extrémité de ce fil ne sont plus isochrones; on doit donc le rejeter.

L'un des corps est placé entre les deux plans en cuivre, et poli sur l'une de ses faces, s'il est minéral, et quand il en est susceptible; et l'autre, que l'on prend ordinairement de liége ou de moelle de sureau dans les expériences comparatives, a la forme d'un petit disque de très-peu d'épaisseur et de même diamètre que le disque de clinquant de la balance. Il suit de là que lorsque ces deux disques, après avoir été ramenés tous les deux au zéro de l'échelle, sont en contact, il y a partage égal d'électricité: la répulsion a lieu aussitôt, et on en mesure l'effet au moyen d'une circonférence de cercle divisée, tracée sur la planchette horizontale. La forme plus ou moins cylindrique de la cage ne peut donc altérer en rien la valeur des degrés. On détermine exactement la position du bras de levier qui porte le disque de clinquant au moyen d'une règle verticale, posée sur un support circulaire, que l'on promène le long de la circonférence du cercle, et dont le centre correspond au prolongement du fil de torsion. Voyons maintenant où conduit le partage égal d'électricité entre les deux disques. On sait que la force totale de la répulsion varie, pour chaque distance, dans le même rapport que les quantités d'électricité qui contribuent à cette répulsion; il est donc nécessaire que l'expression de son énergie, qu'on appelle réaction électrique, soit proportionnelle au produit de ces deux quantités. Représentons par x l'excès d'electricité acquis par le disque de liége ou de moelle de sureau, au sortir de la compression: aussitôt après le contact avec le disque de clinquant, l'un et l'autre posséderont un excès d'électricité $\frac{1}{2}x$, la réaction électrique sera donc exprimée par $\frac{1}{4}x^2$; mais cette même

réaction est donnée directement par l'expérience, puisque l'arc de cercle qui mesure l'écart des deux disques lui est proportionnel, en tant que cet arc peut être pris pour sa corde; ce qui peut toujours se faire en tordant convenablement le fil de suspension. Soit e cet arc, on aura $e = \frac{1}{4} x^2$; d'où $x = 2\sqrt{e}$. Telle est la valeur de la quantité d'électricité acquise par le disque de moelle de sureau après une pression P. Pour une autre pression P' on aura $x' = 2\sqrt{e'}$; mais si l'on ramène par la torsion, dans les deux expériences, les deux disques à la même distance, les valeurs de x et x' deviendront comparables, et on en déduira le rapport des intensités électriques dû à des pressions différentes.

Cette manière de déterminer la quantité d'électricité produite par une pression quelconque peut être employée toutes les fois que la répulsion du disque de clinquant, après le partage d'électricité, est mesurée par un arc d'un certain nombre de degrés; mais souvent le dégagement de l'électricité est si faible, que la réaction électrique devient inappréciable, malgré la grande sensibilité de torsion du fil de platine. Il faut donc avoir recours à un autre expédient. Il suffit pour cela de donner au disque de clinquant une quantité d'électricité dont on peut déterminer à chaque instant l'intensité; alors tous les résultats deviennent comparables. On place dans la cage de la balance un second disque de clinquant de même diamètre que le premier, et isolé de la même manière; on l'électrise au moyen d'un fil de laiton qui traverse la cage; puis on met en contact les deux disques de clinquant, en tournant convenablement le tambour qui porte le micromètre; il y a de suite partage égal d'électricité, puis répulsion. On tourne de nouveau le micromètre pour ramener les deux disques à une distance mesurée par un petit arc de dix degrés, qui peut être pris pour sa corde. Soit a le nombre de degrés dont on a tordu le fil, $\sqrt{10^{\circ} + a}$ représentera la quantité d'électricité possédée par chaque disque de clinquant. Les choses

étant ainsi disposées, retirons les deux corps de la compression, et plaçons le disque de liége, qui est censé avoir acquis un excès d'électricité de même nature que celle qui a été communiquée au disque de clinquant, au zéro du cercle horizontal, en y ramenant aussi le disque de clinquant qui possède une quantité d'électricité $\sqrt{10^{\circ}+a}$, il y aura répulsion. Ramenons encore par la torsion les deux disques à une distance angulaire de dix degrés, et soit d le nombre de degrés dont il faudra tordre pour cela le fil, on aura évidemment, en représentant par y l'excès d'électricité possédé par le disque de liége ou de sureau, $y.\sqrt{10+a}=10+d$; d'où :

$$y=\frac{10+d}{\sqrt{10+a}}.$$

Telle est l'expression de la quantité d'électricité due à une pression P. Pour une autre pression P′ on aura :

$$y'=\frac{10+d'}{\sqrt{10+a'}},$$

y', a', d' étant des quantités analogues à y, a et d; donc les intensités électriques provenant de deux pressions P et P′ sont entre elles comme :

$$\frac{10+d}{\sqrt{10+a}}:\frac{10+d'}{\sqrt{10+a'}}.$$

Usage de l'appareil.

59. Les surfaces des corps soumis à la pression doivent être, autant que possible, dans un état semblable de poli; sans cette précaution les résultats ne seraient pas comparables, attendu que le plus ou moins de poli influe singulièrement sur la quantité d'électricité développée. Si ce sont des substances minérales, on les taille en plaques minces, et on leur donne tout le poli que l'art peut

atteindre, ou bien, ce qui est encore préférable, on les clive naturellement quand elles en sont susceptibles. Ensuite on lave la surface avec de l'alcool pour enlever les matières grasses, et on laisse séjourner le corps pendant quelque temps dans l'air sec de la balance, pour enlever la petite couche d'humidité qui adhère ordinairement à la surface de tous les corps. Quant aux substances qui ne sont pas minérales, on se contente de les priver de leur eau hygrométrique. Cette dernière précaution est indispensable; car certaines substances, telles que la baryte sulfatée cristallisée, le mica, la chaux sulfatée, ne sont électriques par pression qu'autant qu'elles ont été desséchées préalablement.

A l'instant où l'on place les deux corps l'un sur l'autre, il faut éviter qu'ils éprouvent du frottement; car il en résulterait une complication d'effets dont on ne pourrait rendre compte. On remplit cette condition en posant ces corps de manière à ce que le fléau de la balance n'éprouve d'oscillations dans aucun sens; on fixe pour cela au pied de l'appareil une tige verticale, qui monte ou descend au moyen d'un engrenage à crémaillère, et qui est terminé, à sa partie supérieure, par une fourchette dans laquelle on place un des bras du fléau de la balance. Cet engrenage est tellement disposé, que le fléau de la balance peut monter et descendre sans oscillations latérales. De plus, pour être bien certain que le plus petit frottement n'a pas influé sur la quantité d'électricité due à la pression, on laisse subsister celle-ci pendant quelque temps.

Dans les expériences qui ont pour but de déterminer le rapport entre les intensités électriques et les pressions correspondantes, on doit éviter d'employer des substances à l'égard desquelles de légères altérations dans les surfaces apportent de grandes différences dans les quantités d'électricité développée. Par exemple, le liége et la moelle de sureau ne pourraient convenir pour leur pression réciproque, attendu que le plus petit changement de température, dans l'un de ces deux corps, suffit souvent

pour modifier considérablement les résultats. Il faut employer des substances telles que la baryte sulfatée et le liége.

Il est difficile de déterminer la loi des intensités électriques dues à une même pression et à des vitesses de séparation différentes. Les recherches que cette loi exigerait ne peuvent être faites avec l'appareil décrit; mais on trouve facilement la loi des intensités électriques qui résultent de différentes pressions, et de vitesses de séparation donnant le maximum d'effets. Supposons donc que par des expériences préliminaires on ait déterminé les vitesses maxima, et voyons ce qui arrive quand les pressions croissent, et pressons-les toutes avec le même disque de sureau.

SUBSTANCES PRESSÉES.			Le Spath d'Islande clivé naturellement. Le Liege.		
Pressions.	Vitesse donnant le maximum.	Valeur de a.	Valeur de d.	Intensit électriq. deduites de la formule $\frac{10+d}{\sqrt{10+a}}$.	Moyenne.
1					1,5
2	»	20	10	3,6	3,4
id.		20	9	3,2	
3	»	28	10	4 2	4,6
id.		6	10	5 0	
4	»	6	14	6.2	6.0
id.	»	10	16	0,5	

On voit donc que, pour les pressions

	1	2	3	4
les intens. élec. sont	x	3,4	4,6	6.

Les intensités électriques croissent donc proportionnellement aux pressions, puisqu'en supposant $x = 1,5$ on aurait des résultats qui différeraient peu de ceux qui sont donnés par l'expérience.

Pressions........	1	2	3	4
Inten. élec. calcul..	1,5	3,0	4,5	6.

60. Le spath d'Islande poli, soumis aux mêmes expériences que le spath d'Islande clivé naturellement, a constamment donné, pour une même pression, une quantité d'électricité moins forte que le second, dans le rapport de 2 à 6; c'est-à-dire que dans le spath d'Islande poli, la faculté électrique par pression est à peu près le tiers de ce qu'elle est dans l'autre. Cette différence est remarquable, attendu que le poli, dans les substances minérales, augmente ordinairement le pouvoir électrique, tandis qu'il diminue dans le spath d'Islande. L'état hygrométrique ne paraît être pour rien dans cette différence, puisque le cristal a été privé d'eau avant l'expérience.

Soumettons à la pression d'autres substances.

SUBSTANCES PRESSÉES. { La Baryte sulfatée crisallisée, polie. Le Liége.

Pressions.	Vitesse.	Valeurs de a.	Valeurs de d.	Intensit. électriq. déduites de $\frac{10+d}{\sqrt{10+a}}$.	Intensités électriques calculées.
1....	....	....	....	....	 1,05
2....	....	... 10 ...	.. 1 ..	 2,0	
id....	....	... 10 ...	.. 0 ..	.... 2,2 } 2,1....	 2,1
id....	....	... 15 ...	.. 0 ..	 2,0	
3....	....	... 15 ...	.. 6,0 ..	 3,2	
id....	....	... 15 ...	.. 5,5 ..	.... 3,1 } 3,1....	 3,1
id....	....	... 6 ...	.. 2 ..	 3,0	
4....	....	... 15 ...	.. 12 ..	 4,4	
id....	....	... 20 ...	.. 13 ..	.... 4,2 } 4,2....	 4,2
id....	....	... 0 ...	.. 3 ..	 4,2	
6....	....	... 5 ...	.. 14 ..	.... 6,1 } 6,1....	 6,3
6....	....	... 10 ...	.. 18 ..	.... 6.2	

On voit encore, par les résultats consignés dans ce tableau, que les intensités électriques croissent proportionnellement aux pressions.

SUBSTANCES PRESSÉES.	Le Quartz hyalin poli. Le Liége.				
Pressions.	Vitesse.	Valeurs de a.	Valeurs de d.	Intensités électriq. déduites de $\frac{10+d}{\sqrt{10+a}}$.	
4		1	3	4,1	3,9
id.		30	29	3,1	
id.		4	6	4,2	
id.		26	15	4 1	
SUBSTANCES PRESSÉES.	La Chaux sulfatée. Le Liége.				
4		26	3	2,1	1,9.
id.		20	0	1,8	
id.		6	2	2,0	
id.		*id.*	*id.*	*id.*	

Soient i, i', i'', i''', les intensités électriques du spath d'Islande, de la baryte sulfatée, du quartz hyalin, et de la chaux sulfatée, on aura pour la même pression $i : i' : i'' : i'''$ :: 6 : 4,2 : 3,9 : 1,9. On voit que la puissance électrique, dans la chaux sulfatée, est environ trois fois moindre que dans le spath d'Islande, c'est-à-dire que ces deux substances, sous la même pression d'un disque de liége, emportent chacune un excès d'électricité positive, qui est trois fois plus fort dans le spath d'Islande que dans l'autre.

61. Ces expériences montrent que l'intensité électrique pour des pressions, depuis un kilogramme jusqu'à dix kilogrammes, est proportionnelle à la pression, c'est-à-dire que, pour une pression double, l'intensité électrique est double. Dans ces expériences, la vitesse de séparation donne le maximum d'intensité électrique.

Cette loi s'étend-elle à des pressions plus fortes? Il est difficile de répondre à cette question; car l'appareil dont on a fait usage ne permet que d'employer des pressions peu considérables : cependant, si le dégagement d'électricité est dû, comme il est probable, au rapprochement des molécules, on conçoit que l'effet devra cesser de croître quand elles auront atteint un certain degré de compression; car il arrive un point où elles ne se comprimeront plus que très-difficilement.

On serait peut-être porté à croire que la chaleur dégagée dans la pression est la cause du dégagement de l'électricité; l'expérience suivante prouvera le contraire, en même temps qu'elle montrera l'influence du rapprochement des molécules, pour augmenter le dégagement de l'électricité, quand on vient à séparer les corps. L'appareil décrit ci-dessus va encore nous servir : deux corps se trouvant sous l'action d'une certaine pression, si l'on vient à diminuer celle-ci de moitié, l'effet de la pression perdue subsiste pendant un temps, dont la durée dépend du degré de conductibilité; de sorte que, si l'on retire immédiatement ces corps de la compression, chacun d'eux emporte avec lui un excès d'électricité contraire, plus grand que celui qui est dû à la pression restante. Maintenant, au lieu de séparer les corps, lorsque la pression a été diminuée, on rend celle qui a été enlevée, et l'on répète plusieurs fois ce mode d'action. Une lame de spath d'Islande et un disque très-mince de liége ont donné les résultats suivants : ces deux corps étant d'abord sous la pression de 4 kilogrammes, on a réduit celle-ci à moitié, sans déranger le contact, et une minute après on les a séparés. La tension électrique de chaque disque était représentée par 170; si la séparation eût eu lieu pendant la pression de 4 kilog., la tension aurait été de 250, et pendant la pression de 2 kilog., de 125, moitié de la précédente. On voit donc que, dans le premier cas, l'effet produit par la pression qui a été perdue subsiste encore en partie. Au lieu de séparer les corps, quand on a réduit la pression de 4 à 2,

on leur rend la pression 2 qui a été enlevée, et l'on répète plusieurs fois ce jeu alternatif de pressions simples et de pressions doubles. On trouve, en définitive, que le disque de liége ne possède jamais plus que l'intensité 250, relative à la pression la plus forte.

En considérant la manière dont le dégagement de l'électricité croît dans les corps, par l'augmentation de la pression, ne peut-on pas y rapporter certains phénomènes lumineux, dont on ne connaît pas encore bien l'origine? On dit, par exemple, que, dans les mers polaires, il arrive souvent que des blocs de glace, en se heurtant, font rejaillir de la lumière. Ces blocs énormes arrivent à la rencontre les uns des autres, avec des quantités de mouvement considérables, leurs parties constituantes doivent éprouver une compression énorme, qui les constitue chacun dans un état électrique différent; mais aussitôt que la compression a cessé, les deux électricités se recombinent pour former du fluide neutre, et il en résulte une lumière plus ou moins vive selon la tension de l'électricité dégagée.

§ XIV. *Effets électriques de clivage.*

62. Je suis conduit naturellement à parler des effets électriques produits dans le clivage des substances minérales régulièrement cristallisées, en raison des relations qui existent entre ces effets et ceux que l'on observe dans la pression.

Lorsque l'on clive rapidement une lame de mica dans l'obscurité, on aperçoit assez ordinairement une faible lueur phosphorique. Si l'on fait l'expérience, en fixant avec du mastic, sur chacune des faces de cette lame, un manche isolant, on trouve que chacune des parties séparées possède un excès d'électricité contraire, dont l'intensité est d'autant plus grande que la séparation a été plus vive. On obtient toujours ces résultats, quelque mince que soit la lame de mica; ainsi il est probable qu'on les aurait encore, si l'on pouvait séparer deux mo-

lécules l'une de l'autre, et même leurs parties constituantes. Le talc feuilleté du Saint-Gothard, la chaux sulfatée limpide, la topaze, la baryte sulfatée, le feldspath du Saint-Gothard, ainsi que toutes les substances cristallisées qui sont rangées dans la classe des mauvais conducteurs, donnent le même résultat.

Avant de faire ces expériences, il est nécessaire d'enlever aux cristaux l'eau hygrométrique qui adhère ordinairement à leur surface, et de s'assurer que les substances, qui se séparent facilement en lames, ne sont pas déja clivées en partie, comme le mica et la chaux sulfatée nous en offrent souvent des exemples. Deux lames de mica détachées du même morceau, étant rapprochées et pressées de nouveau, sortent encore de la compression dans les mêmes états électriques qu'elles avaient reçus lors du clivage; mais cette propriété est de courte durée. Si l'on veut la leur rendre, il faut élever légèrement la température de celle qui avait pris l'électricité négative. Le dégagement de l'électricité dans le clivage n'est soumis à aucune loi, c'est-à-dire que la face semblablement placée de chaque lame ne prend pas toujours la même espèce d'électricité.

63. Une carte dédoublée présente des effets analogues. Que se passe-t-il dans cette action? Les petits filaments dont se composent les cartes sont liés les uns aux autres par une force quelconque que l'on détruit; il est donc naturel que leur séparation produise des effets semblables à ceux que donne le clivage des cristaux. Quand on broie dans un mortier d'agate des minéraux cristallisés, on ne doit pas avoir d'électricité libre, car il y a recomposition immédiate des deux électricités dégagées sur les diverses lamelles qui restent à côté les unes des autres. C'est ce qui arrive encore lorsqu'on brise des corps qui sont cristallisés irrégulièrement, comme des tubes de verre, des bâtons de gomme laque, etc.

La pression, comme on sait, opère un rapprochement mécanique des molécules, qui finit quelquefois

par les faire adhérer les unes aux autres; leur séparation doit donc donner des effets électriques analogues à ceux que l'on observe dans le clivage. Voici encore d'autres effets électriques, qui sont dus également à la destruction de l'attraction moléculaire. Un cône de soufre, qui a été moulé dans un verre et qui adhère à la surface, prend, quand on l'en détache, l'électricité positive, et le verre l'électricité négative. On obtient des effets semblables avec le chocolat et l'acide phosphorique après leur solidification, ainsi qu'avec le proto-chlorure de mercure lorsqu'on l'enlève de la partie supérieure du matras où il a été sublimé.

§ XV. *Dégagement de l'électricité par frottement.*

63. Les expériences précédentes laissent déja entrevoir le rôle que peut jouer l'attraction moléculaire dans les phénomènes relatifs au dégagement de l'électricité. Voyons jusqu'à quel point cette attraction peut influer sur ces phénomènes.

On croit généralement que le frottement est dû à l'entrelacement réciproque des aspérités qui recouvrent les surfaces de contact; mais est-ce bien là la seule cause du phénomène? L'action des molécules les unes sur les autres n'intervient-elle pas aussi pour exercer une influence sur le frottement? On cite en faveur de la première opinion, que le frottement est d'autant plus grand que les corps sont plus rudes et plus couverts d'aspérités; et en faveur de la seconde, que si l'on fait glisser l'une sur l'autre deux plaques de marbre ou de verre polies, afin qu'elles se touchent le plus exactement possible, elles finissent par adhérer fortement l'une à l'autre, indépendamment de la pression de l'air, puisque cet effet a encore lieu dans le vide.

On a remarqué en outre que les mêmes corps, après être restés pendant quelque temps en contact, opposaient plus de résistance à leur séparation que dans le premier moment; tout porte donc à croire que l'attrac-

tion moléculaire est aussi une des causes du frottement. Cette réaction, en déterminant un dérangement dans l'équilibre naturel des molécules, doit troubler aussi celui des forces électriques; car on peut poser en principe, dès à présent, qu'il y a dégagement d'électricité toutes les fois que les molécules des corps éprouvent un déplacement quelconque, bien qu'on ne puissse pas toujours observer ce dégagement. Pour étudier avec méthode le dégagement de l'électricité par frottement, nous commencerons par les métaux, dans lesquels les effets ne sont pas aussi variables que dans les autres corps, quand il existe de légères différences dans l'état de leurs surfaces. Lorsque l'on fixe à chaque bout du fil d'un multiplicateur, à fil court, une plaque de métal différent, et que l'on pose les deux plaques l'une sur l'autre, en les maintenant à la température de l'air ambiant, il n'y a aucun dérangement dans l'équilibre des forces électriques; mais pour peu qu'on les fasse glisser l'une sur l'autre avec un léger frottement, chacune d'elles prend aussitôt un excès d'électricité contraire, dont la recomposition, par l'intermédiaire du fil du multiplicateur, donne naissance à un courant électrique. En soumettant ainsi à l'expérience un certain nombre de plaques métalliques, on forme le tableau suivant, dans lequel chaque métal est négatif par rapport à ceux qui le suivent, et positif relativement à ceux qui le précèdent : bismuth, nickel, cobalt, palladium, platine, plomb, étain, cuivre, or, argent, zinc, fer, cadmium, arsenic, antimoine. Cet ordre est précisément le même que celui que l'on obtient avec des circuits fermés, composés successivement de deux de ces métaux, quand on élève la température d'une des soudures, l'autre restant constante. L'état électrique de chaque métal ne change pas lorsque les surfaces des plaques sont dépolies. Les effets produits sont donc dus à la nature particulière de chaque métal, et non à l'état des surfaces. Il est facile de prouver que l'espèce d'électricité acquise par chaque métal est indépendante du plus ou moins de frottement

que chacune d'elles éprouve. En effet, au lieu de plaques, si l'on opère avec des cylindres de fer et de cuivre, par exemple, d'un décimètre de longueur, et que l'on passe rapidement le bout de l'un sur la surface de l'autre, dans toute sa longueur, afin que les mêmes points du premier soient soumis continuellement à l'action du frottement, et s'échauffent par conséquent davantage que les points de la surface de l'autre, le résultat sera le même, quel que soit le bout frottant. Cette expérience montre que le plus ou moins de frottement qu'éprouve chacune des particules des surfaces, n'a aucune influence sur l'espèce d'électricité acquise par chacune d'elles; il faut donc aussi que le plus ou moins de chaleur qui est dégagée sur chacune des surfaces n'influe pas sur le sens du courant.

64. Plusieurs questions se présentent ici. Le dégagement de chaleur qui a lieu dans le frottement n'est-il pas la cause première du phénomène? Le frottement, en augmentant la force attractive des corps, n'exalte-t-il pas les effets électriques qui résultent de l'action de cette force, ou bien ne détermine-t-il pas un ébranlement particulier dans les molécules de chaque corps, dont la différence produit les effets observés? Les expériences suivantes pourront servir à jeter quelque jour sur ces diverses questions. Soient deux lames de bismuth et d'antimoine, soudées chacune à l'un des bouts du fil du multiplicateur. Si, par l'effet du frottement, il y a dégagement d'électricité, les deux fluides se recombineront aussitôt que le frottement qui les aura produits aura cessé, une portion sur la surface même de contact, et l'autre en suivant le circuit. On conçoit très-bien que le dérangement continuel des parties frottées mettant à chaque instant un certain intervalle entre celles qui ont subi les premières l'effet du frottement et les dernières, il en résulte qu'une portion des deux électricités éprouve d'autant moins de difficulté à suivre le circuit du multiplicateur, pour se recombiner, que la distance qui sépare les premières parties frottées des dernières est

plus grande, c'est-à-dire que le frottement a été plus rapide. C'est le cas d'un courant qui se partage en plusieurs autres, suivant le degré de conductibilité de chaque circuit. L'expérience suivante vient à l'appui de cette explication. Au lieu de passer les deux lames l'une sur l'autre avec frottement, si on les presse ou qu'on les frappe fortement, à coups redoublés, de manière à éviter un frottement latéral, il n'y a pas de courants, et par conséquent point de dégagement d'électricité apparent, quoique les surfaces soient plus fortement ébranlées et qu'il y ait plus de chaleur dégagée que lorsque l'on frotte légèrement les deux lames l'une sur l'autre. Il faut donc, puisque les mêmes points des surfaces restent constamment en contact, 1° que l'électricité dégagée sur chacune d'elles n'ait pas eu besoin pour se recombiner de suivre le fil du multiplicateur, la recomposition s'étant opérée instantanément; 2° que la chaleur produite dans le frottement ne soit pas la cause unique des effets électriques, car celle qui se dégage pendant un choc violent est probablement plus considérable que celle qui est produite par un faible frottement. Il est donc probable que le déplacement des parties des surfaces frottées donne lieu à un dégagement de chaleur et à un dégagement d'électricité qui sont indépendants l'un de l'autre. Mais par cela même qu'ils sont simultanés et indépendants, doit-on les considérer comme du même ordre, c'est-à-dire que si l'un provient d'un mouvement vibratoire imprimé à une substance éthérée, qui existe dans l'espace et pénètre tous les corps, l'autre ne résulterait-il pas d'un mouvement analogue plus ou moins rapide dans cette même substance? c'est ce que l'on ne peut décider encore. D'un autre côté, la réaction chimique des deux métaux l'un sur l'autre, pendant le frottement, n'est-elle pas la cause du dégagement de l'électricité? C'est une question à laquelle nous serons ramenés plusieurs fois dans le cours de cet ouvrage.

65. D'après ce qui se passe dans le choc et la pression des lames de métal, où le contact des molécules ne

change pas, il ne doit pas y avoir d'électricité rendue libre quand on fait vibrer les corps élastiques; car bien que les molécules éprouvent toutes un déplacement, elles ne cessent pas cependant d'être liées entre elles par la force d'agrégation : dès lors, les deux électricités dégagées dans deux molécules contiguës doivent se recombiner immédiatement pour former du fluide neutre, comme dans le cas du choc. En général, dans toutes les expériences relatives au dégagement de l'électricité, on n'obtient de l'électricité qu'autant qu'il en échappe à la recomposition; l'expérimentateur doit donc s'attacher à multiplier les obstacles pour empêcher cette recomposition.

66. Après avoir exposé les effets électriques qui sont produits dans le frottement de deux lames de métal l'une contre l'autre, examinons les modifications qu'ils éprouvent quand l'un des métaux est réduit en limailles plus ou moins fines : c'est le moyen de voir jusqu'à quel point l'état d'agrégation des molécules exerce une influence sur le phénomène.

Le procédé à l'aide duquel on observe les effets du frottement des limailles métalliques sur une lame de métal, consiste à tenir celle-ci d'une main, dans une position inclinée, et à projeter dessus les limailles que l'on recueille dans une capsule de métal qui est vissée à la tige verticale de l'électroscope (fig. 9). Si la lame ne communiquait pas avec le réservoir commun, elle transmettrait aux parcelles de métal, qui viendraient ensuite, l'électricité qu'elle aurait reçue des premières, ce qui atténuerait l'effet cherché.

Lorsque l'on projette la limaille d'un métal sur une lame de ce métal, celle-ci prend un excès d'électricité positive, et la limaille un excès d'électricité contraire; l'effet est d'autant plus marqué, que la limaille est plus fine et le choc plus rapide. Les métaux en limaille se comportent donc, par rapport aux mêmes métaux en masse, comme les corps dépolis relativement aux corps polis : cette propriété est moins sensible dans l'or, l'argent et le platine que dans les métaux oxidables.

La limaille de cuivre est négative avec les lames de zinc, de plomb, d'étain, de fer, de bismuth et d'antimoine, c'est-à-dire avec les métaux plus positifs que le cuivre : elle ne donne au contraire aucun signe d'électricité avec le platine, l'or et l'argent. Ce résultat, ainsi que ceux du même genre obtenus avec les autres métaux, tendent à établir cette vérité : que les métaux en limaille, quand ils tombent sur une lame de métal, ont une tendance à prendre l'électricité négative; mais que cette tendance néanmoins n'empêche pas que la limaille d'un métal positif ne soit positive par rapport aux métaux les plus négatifs. On trouve effectivement que le zinc en limaille est positif par rapport aux substances en lames dont les noms suivent : le platine, l'or, l'argent, le carbure de fer, le persulfure de fer, le cuivre et l'étain. Il est négatif par rapport au zinc, au bismuth, à l'antimoine et au fer; mais plus fortement avec le premier qu'avec les derniers; il ne donne enfin aucun signe d'électricité avec le peroxide de manganèse.

Les oxides métalliques, ainsi que leurs sulfures, sont négatifs par rapport à leurs métaux. Il faut éviter que les poussières soient trop fines, car elles s'attachent alors aux surfaces, et empêchent le frottement des parties qui viennent ensuite. Quatre hypothèses peuvent être mises en avant pour expliquer les faits observés : 1° le dérangement des molécules, qui n'est pas le même dans les deux corps; 2° l'influence de la chaleur qui est dégagée dans le frottement; 3° l'influence des agents atmosphériques sur les métaux; 4° l'action des métaux les uns sur les autres. Avant de discuter le mérite de ces quatre hypothèses, je rapporterai quelques observations qui tendent à prouver que le phénomène dépend de propriétés relatives à la structure des corps, et non de la chaleur dégagée. L'antimoine est le plus électro-positif des métaux dans les phénomènes thermo-électriques et les phénomènes de frottement, et sa limaille est positive par rapport aux lames de métal; voilà un cas d'exception, et le seul qui ait été observé dans le frottement des li-

mailles sur une lame de même métal. La même limaille est positive avec tous les métaux, excepté avec le zinc. Nous retrouvons donc là la grande faculté électro-positive que possède l'antimoine dans les effets électriques de frottement et de chaleur : cette faculté est sans doute inhérente à sa nature.

67. Examinons jusqu'à quel point la chaleur qui se dégage dans le frottement des lames et des limailles influe sur les phénomènes précédemment décrits. Il faut faire varier pour cela successivement la température des lames et des limailles.

	LIMAILLÉ : état électrique à la températûre ordinaire.	LAME MÉTALLIQ. : état électrique à la températuro ordinaire.	EFFETS obtenus en portant la température des limailles jusqu'à 60°.	EFFETS obtenus en élevant la température des limailles et des lames jusqu'à 60°.
1er groupe.	Zinc. +	Platine........ — Or. . ... — Argent........ — Cuivra........ — Carbure de fer.. —	Le Zinc devient négatif.	Le Zinc devient plus fortement négatif.
2e groupe.	Zinc. —	Zinc.......... + Fer..... ..... + Bismutb....... + Antimoine. .... +	Les effets augmentent.	Ils augmentent également.
3e groupe.	Peroxide de manganèse.....	Or........... — Platine........ — Cuivre........ — Zinc.......... — Peroxide de manganèse....... —	Les effets sont fortement exaltés.	

Nous voyons, dans le premier groupe, qu'à mesure que l'on élève la température, soit de la limaille de zinc, soit de la limaille et des lames, les résultats sont inverses de ceux que l'on obtient à la température ordinaire ; dans le deuxième et troisième groupe, que la chaleur exalte le pouvoir négatif du zinc et celui de peroxide de manganèse. La tendance de la limaille de zinc pour devenir négative par l'action de la chaleur, est donc telle, que lorsqu'elle est positive, elle perd peu à peu cette faculté, devient nulle, puis négative. La chaleur agit donc, dans cette circonstance, comme

le fait ordinairement la division des parties, quand on opère avec des limailles de plus en plus fines. Ces faits montrent que les causes d'où dépend le dégagement de l'électricité, dans le frottement des limailles sur les lames de métal, sont essentiellement liées à celles qui constituent la force d'agrégation. S'il était possible d'isoler un atome d'un métal quelconque, et qu'on le laissât tomber sur une lame du même métal, il serait éminemment négatif, en même temps qu'il s'échaufferait considérablement.

68. Pour juger jusqu'à quel point la vitesse de projection influe sur les effets électriques, il faut soumettre le frottement des limailles, sur les lames, à un mode d'action régulier, qui permette d'opérer dans les mêmes circonstances. On prend une horloge à ressort, qui imprime un mouvement de rotation rapide à une tige verticale, à l'extrémité de laquelle est fixée une lame de métal horizontale. Lorsqu'on projette sur cette lame des poussières quelconques, elles sont lancées aussitôt à une distance qui dépend de la vitesse de rotation; de sorte que leur contact n'est qu'instantané. En posant l'appareil sur un électroscope à feuille d'or, celui-ci accuse aussitôt l'électricité que la lame a prise à la limaille pendant le temps très-court que le frottement a duré. Voici quelques résultats obtenus de cette manière. Le peroxide de manganèse en poudre, projeté sur une lame de zinc, d'étain ou d'or, soumise à un mouvement rapide de rotation, prend l'électricité négative; l'argent très-divisé et le sulfure de fer en poudre donnent le même résultat. Le peroxide de manganèse est une des substances qui donnent le plus grand effet. L'action de l'air ne peut exercer aucune influence, puisque l'effet est le même quand le métal est oxidable ou non. La limaille de zinc ne donne aucune électricité quand elle tombe sur une lame de même métal, dont le mouvement est rapide, tandis qu'elle reçoit un excès d'électricité négative quand la lame est en repos. Cette expérience indique que la vitesse de rotation imprimée à la lame de zinc aug-

mente sa tendance négative, et que, dans la même circonstance, pour conserver à la limaille sa faculté né ative, il faudrait pouvoir la projeter en poudre d'une grande ténuité. Quand une lame de zinc est en mouvement, et qu'on la touche avec un morceau d'oxide de manganèse, l'équilibre des forces électriques est également dérangé; mais, pour le reconnaître, il faut employer un multiplicateur; car, le contact subsistant quelques instants, les deux électricités se recombinent aussitôt, et il est impossible alors d'avoir des effets de tension. On n'obtient non plus aucun résultat quand les limailles ont plusieurs millimètres de grosseur. On voit donc que le dégagement de l'électricité paraît, dans les circonstances où nous avons opéré, dépendre de la nature des corps, de l'état de division de leurs parties, et de la vitesse imprimée aux lames. On peut déja dire que le corps dont les parties éprouvent le plus de déplacement a une tendance à produire l'électricité négative. Nous examinerons plus loin l'influence de l'action chimique.

§ XVI. *Effets électriques produits dans le frottement des corps mauvais conducteurs.*

69. Dans les corps mauvais conducteurs de l'électricité, l'état des surfaces a beaucoup plus d'influence sur la nature de l'électricité que prend chacune d'elles, que dans les métaux, puisque la plus légère différence suffit pour leur faire prendre telle ou telle espèce d'électricité. L'examen des causes qui déterminent le dégagement de l'électricité, dans le frottement en général, devient donc très-difficile. En raison de son importance, nous allons examiner cette question, en prenant en considération tous les faits qui ont enrichi successivement cette partie de la science depuis une trentaine d'années.

Quand on frotte deux corps quelconques l'un sur l'autre, conducteurs ou non de l'électricité, l'un prend l'électricité positive, et l'autre l'électricité négative; il faut avoir seulement l'attention d'isoler le corps conducteur. En

général, ces deux effets sont toujours simultanés, excepté dans un seul cas, que nous ferons connaître : ainsi donc tous les corps sont électriques par frottement.

On sait depuis long-temps que lorsque deux rubans de soie blancs, pris dans la même pièce, sont frottés en croix l'un sur l'autre, celui qui est frotté transversalement prend l'électricité négative, et l'autre l'électricité positive. Mais comme les points de la surface du premier éprouvent davantage l'action du frottement que les points de la surface du second, ils sont soumis à un ébranlement plus considérable, s'échauffent aussi plus que les autres, et se trouvent par conséquent dans les conditions voulues pour prendre l'électricité négative. Deux autres corps parfaitement identiques, tels que deux bâtons de cire d'Espagne, frottés de la même manière que les rubans, donnent quelquefois un résultat semblable, quand le frottement n'altère pas les corps, au point que celui qui éprouve le plus l'effet du frottement, emporte avec lui quelques portions de la surface de l'autre; car, dans ce cas, les deux électricités dégagées se recombinent immédiatement sur les deux parties qui restent unies. Prenons maintenant deux corps semblables, ne différant que par l'état de leur surface, afin d'éviter les effets qui résultent de la différence de nature : quand on frotte une plaque de verre poli contre une autre qui ne l'est pas, celle-ci prend l'électricité négative; on voit ici l'application du principe qui a été posé, puisque les particules de la surface de cette dernière éprouvent un plus grand déplacement que celles de l'autre, qui est polie. Par le même motif, l'élévation de température, rendant ces mêmes particules plus élastiques, augmente aussi la tendance négative.

Le peu d'accord que l'on observe souvent entre les résultats obtenus par divers physiciens, qui se sont livrés à des recherches sur le dégagement de l'électricité, vient de ce qu'ils n'ont pas tenu compte de l'effet que je viens de signaler, savoir, que lorsque l'un des corps soumis à l'expérience est entamé par l'autre, celui-ci, outre

l'électricité qui lui est propre, prend encore, avec la petite couche mince de la substance qu'il enlève, une portion d'électricité propre à cette dernière; de sorte que la sienne, se trouvant modifiée, peut être positive, nulle ou négative. Ces trois effets se rencontrent quelquefois dans le frottement rapide d'un bâton de cire d'Espagne contre une plaque de métal. On ne saurait donc trop se garantir de cette cause d'erreur, dans des expériences relatives au dégagement de l'électricité par frottement.

70. M. Auguste Delarive a fait quelques expériences à ce sujet, dont voici les principaux résultats (1). Lorsqu'on passe légèrement le doigt ou une substance quelconque sur une surface métallique en contact avec un des plateaux du condensateur, ou avec un électroscope ordinaire, il y a un dégagement sensible d'électricité. Il faut avoir soin que la main soit très-sèche, car si elle est humide, il n'y a aucun effet de produit.

Les métaux frottés avec la main ne prennent pas tous la même espèce d'électricité; l'antimoine, par exemple, est négatif, et le bismuth positif, résultat inverse de celui que l'on obtient quand on frotte ces deux métaux l'un contre l'autre.

En se servant, pour corps frottants, de l'ivoire, de la corne, du liége, et de diverses espèces de bois, les métaux suivants acquièrent souvent l'électricité négative: le rhodium, le platine, le palladium, l'or, le tellure, le cobalt et le nickel; tandis que l'argent, le cuivre, le laiton et l'étain, qui sont aussi négatifs, se montrent quelquefois positifs, surtout l'étain. L'antimoine donne les signes les plus fortement négatifs, quoiqu'on le trouve aussi quelquefois positif. La nature de l'électricité sur le fer et le zinc est assez variable; le plomb et le bismuth sont constamment positifs. Pour étudier la cause de ces différences il faut former, avec différents métaux, tels que l'antimoine, le bismuth et le plomb, et ceux qui

(1) Mém. de la Soc. de Phys. et d'h. n. de Genève, t. VI, p. 174.

développent des électricités opposées, l'étain, le zinc et le fer, des cubes d'un pouce de côté, afin d'opérer tantôt sur les faces plus ou moins polies, tantôt sur les arêtes. On trouve les résultats suivants : dans un air très-sec, et avec les doigts ou du bois bien desséché, les métaux incertains, c'est-à-dire ceux qui donnent des électricités contraires, sont toujours négatifs, que la surface frottée soit polie et décapée, ou oxidée.

Quand la surface frottée est grande, le métal devient positif, si l'on promène le frottoir dans toute son étendue. Il acquiert bien plus facilement cet état électrique, en le frottant avec le liége.

Une élévation de température dans l'un des deux corps augmente les effets et modifie leur nature. Le fer, le zinc et l'étain, exposés immédiatement à une haute température, et frottés immédiatement sur une surface bien unie, donnent le plus souvent de l'électricité positive et de l'électricité négative, quand on opère le frottement sur une arête vive. Un frottement plus ou moins rapide n'exerce aucune influence sur le phénomène. M. Delarive a expliqué tous les résultats, et d'autres encore, que je ne mentionne pas ici, en partant du principe que tous les métaux, quand ils sont frottés par le bois, la main, le liége, etc., « prennent l'électricité « négative, pourvu que le frottement s'opère sur une « partie de leur surface qui soit bien décapée. » Il attribue ce changement dans la nature des signes électriques, à ce qu'il se forme très-vite à la surface de certains métaux une légère couche d'oxide, qui est enlevée par le frottoir, de sorte que le frottement n'a plus lieu entre le métal et le bois, mais bien entre le métal et la couche d'oxide métallique qui recouvre le frottoir, le métal étant toujours positif par rapport à son oxide.

Dans le cas où la couche d'oxide est épaisse et ne peut plus être enlevée, le frottement s'opère entre le corps frottant et l'oxide ; dans ce cas, le métal ne contribue en rien à l'effet électrique.

On obtient plus facilement les signes d'électricité

positive sur les métaux, quand on les frotte avec du liége ou du caoutchouc, parce que plus le frottement est doux, plus on enlève facilement la couche d'oxide. Ces résultats montrent combien de précautions on doit prendre dans les recherches relatives au dégagement de l'électricité par frottement pour se garantir de diverses causes d'erreur.

71. L'état des surfaces a une telle influence sur la nature de l'électricité dégagée dans le frottement des corps mauvais conducteurs, qu'il existe une substance minérale cristallisée, à laquelle Haüy a donné le nom de disthène, qui prend l'électricité positive sur certaines faces, et l'électricité négative sur d'autres avec le même frottoir, sans que l'on puisse reconnaître la moindre différence entre elles.

72. Coulomb a fait des expériences sur le dégagement de l'électricité qui peuvent jeter aussi quelque jour sur les causes qui déterminent un corps à prendre telle ou telle espèce d'électricité. Nous devons la connaissance de ces expériences à M. Biot, qui a eu à sa disposition les manuscrits de ce célèbre physicien (1). Une bande de papier chauffée, que l'on frotte contre une étoffe de laine blanche, prend toujours l'électricité négative. Le résultat est encore le même lorsqu'on la frotte contre du métal, à moins que celui-ci n'ait un grand degré de poli. Dans ce cas, elle donne quelquefois des signes très-faibles d'électricité positive.

Avec une étoffe de soie blanche, elle donne également des signes d'électricité négative; mais lorsque l'équilibre de température est rétabli, elle ne donne le plus souvent que des signes d'électricité positive très-faibles.

La même bande de papier chauffé prend toujours l'électricité positive quand on la frotte contre une étoffe de soie noire et de bon teint.

Lorsque la même étoffe est demi-usée, la bande de papier chauffée prend au contraire l'électricité résineuse;

---

(1) Traité de Phys. expérim. et mathém., t. II, p. 354.

frottée de nouveau peu de temps après, elle ne donne d'abord aucun signe d'électricité, mais ensuite elle en donne d'électricité positive.

Un ruban de soie blanche, dont on a élevé la température, prend toujours l'électricité négative dans son frottement contre du métal, tandis que si on le laisse refroidir, il donne des signes d'électricité positive très-faibles quand le métal a un très-grand degré de poli.

Un ruban noir, chauffé ou non, mais soyeux et de bon teint, prend toujours l'électricité négative, quand il est frotté contre un métal, que ce métal soit poli ou non. Dans le cas où le ruban est peu soyeux, il donne quelquefois des signes d'électricité positive. Nous avons dit précédemment que lorsqu'un ruban de soie blanche, chauffé ou non, est frotté contre une étoffe noire et de bon teint de même nature, il prend toujours l'électricité positive; mais si cette étoffe est usée et que le ruban blanc soit chauffé, il donne des signes d'électricité négative tant qu'il est chaud, et devient positif à mesure qu'il se refroidit.

Une étoffe de soie que l'on agite avec une certaine rapidité dans l'air acquiert un excès d'électricité négative; l'air, par conséquent, doit prendre un excès d'électricité positive.

Un ruban de soie, une bande de papier, un ruban de laine, frottés contre une peau garnie encore de son poil, prennent toujours une électricité négative dont l'intensité est plus grande que celle que l'on obtient avec d'autres frottoirs. Tous ces exemples viennent à l'appui des idées que nous avons émises sur la cause principale qui exerce le plus d'influence sur la nature de l'électricité que prend un corps dans son frottement sur un autre corps. Nous voyons effectivement que les tissus ou les fibres de matière animale et végétale dont les parties sont plus ou moins lâches doivent éprouver plus de déplacement que celles des surfaces métalliques sur lesquelles on les frotte. Aussi doivent-elles donner souvent de l'électricité négative.

Ces expériences montrent encore que la chaleur dispose les corps à acquérir l'électricité négative; en écartant les particules, elle les rend plus aptes à être déplacées par le frottement, et les range par conséquent dans la classe des corps dont les surfaces sont recouvertes de légères aspérités.

73. M. Dessaignes a fait également un grand nombre d'expériences sur la génération du pouvoir électrique, et particulièrement dans le frottement du mercure avec certains corps. Les résultats qu'il a obtenus mettent en évidence le principe dont il a été question précédemment (1).

Il distingue trois sortes d'immersion des corps dans le mercure, qui produisent des effets différents : immersion brusque, lente, et immersion qui consiste à enfoncer le corps dans le mercure, et à l'y laisser plus ou moins de temps. Les corps sur lesquels on expérimente sont maintenus préalablement dans un flacon qui renferme de la chaux caustique.

Ordinairement le verre, le soufre, l'ambre et la cire d'Espagne à la température de 10° ne sont électriques par aucun des trois modes. Il en est encore de même jusqu'à 18° au-dessus de zéro, pourvu qu'ils soient à égalité de température avec le mercure. L'ambre ou le succin commence à le devenir par le choc à + 11°, la cire d'Espagne à + 15, et le verre à + 20. Il faut avoir l'attention de laisser ces corps dans le mercure assez de temps pour que l'équilibre s'établisse, et de les retirer ensuite lentement.

Entre 80 et 100° le pouvoir électrique s'éteint même par immersion brusque.

M. Dessaignes établit en principe que ces quatre corps ne sont point électriques dans le mercure à égalité de température, toutes les fois qu'on fait l'immersion sans pression mécanique.

---

(1) Journ. de Phys., t. LXXIII, p. 230.

Il a trouvé que le coton, le papier, la laine sont très-électriques par les trois modes d'immersion depuis + 10° jusqu'à 80°, même à égalité de température avec le mercure.

Le verre, le soufre, le succin et la cire d'Espagne sont toujours électriques quand ils sont un peu plus chauds que le mercure; un degré de différence suffit pour cela.

Un cylindre de verre échauffé à 100° n'est pas électrique, quand on le plonge dans du mercure à 18° au-dessus de zéro.

En opérant d'une manière inverse, un tube de verre n'acquiert également aucune électricité dans du mercure dont la température est portée à 60 ou 80°; mais il devient électrique entre 40 et 50°.

Il a cherché ensuite à déterminer la nature de chaque électricité, dans l'espoir d'accorder les résnltats de Canton, de Vanmarum et Roy. Le premier avait assuré que le verre sortait toujours positif du mercure, et les deux autres qu'il était négatif. Suivant M. Dessaignes, lorsque la colonne de mercure est élevée dans le baromètre, et que l'air tend au froid, le verre, le succin, la cire d'Espagne, le coton, la soie et la laine sont toujours négatifs; ils sont au contraire positifs lorsque le baromètre est bas et que la température de l'air tend à augmenter. Le soufre est toujours resté positif. Pendant l'été, il a trouvé ces corps toujours positifs dans du mercure impur, et négatifs dans du mercure pur.

Une tige de verre, avons-nous dit, à égalité de température, n'est pas excitable dans le mercure. Elle est positive lorsque sa température est un peu plus élevée que celle du mercure, et négative au contraire lorsqu'il y a un grand intervalle entre elles. Ces influences de la température sur le pouvoir électrique ne sont point particulières au mercure, on les trouve encore dans le frottement de ces mêmes corps sur la laine.

Le froid, comme une température très-élevée, éteint le pouvoir électrique.

Ces différents résultats prouvent qu'avec le succin, le soufre, la cire d'Espagne et le verre, c'est-à-dire avec les corps dont les particules des surfaces se déplacent moins facilement, le simple contact avec le mercure ne suffit pas pour les rendre électriques, et qu'il faut encore produire un ébranlement sur ses surfaces, tandis qu'avec le coton, le papier, dont les parties éprouvent facilement des dérangements, en raison de leur élasticité, il suffit d'un très-léger ébranlement, tel que celui qui provient de la rupture de l'action capillaire, exercée par le mercure sur ces substances. En général, on peut dire que les substances fibreuses jouissent de la faculté de s'électriser facilement, par cela même que leurs particules se déplacent plus aisément.

74. M. Dessaignes a recherché aussi quelle était l'influence de la chaleur et du froid sur les métaux, pour modifier leurs facultés électriques dans leur frottement avec divers corps. Les métaux qu'il a soumis à l'expérience sont l'or, le bismuth, le zinc, l'antimoine et le plomb.

Tous ces métaux refroidis jusqu'à 0° ne sont plus électriques par frottement.

Dans les grandes chaleurs de l'été, la marche de l'électricité des métaux est inverse de celle qui a lieu dans l'hiver, car alors la chaleur les rendait positifs, et ils devenaient négatifs par le refroidissement, tandis qu'ici c'est l'inverse.

Il avance avoir constaté, par des expériences positives, que l'air dense influe aussi sur l'électricité des métaux ; par exemple, lorsque le baromètre est haut, et que le vent est au nord ou au nord-est, les métaux sont fortement électriques. Dans cette circonstance, ils sont toujours positifs lorsque la température de l'air tend à monter, et négatifs dans le cas contraire.

M. Dessaignes a obtenu des résultats si singuliers dans les nombreuses expériences qu'il a faites sur le dégagement de l'électricité, qu'il est difficile d'entrevoir la cause qui les a produits; si toutefois il n'y a qu'une seule cause, car tout porte à croire qu'il y en a plusieurs. Dans une

question aussi ardue et aussi compliquée que celle du dégagement de l'électricité, on doit éviter de rejeter les faits qui ne cadrent pas avec les théories généralement adoptées, attendu que ces théories sont tellement incomplètes, qu'on les trouve souvent en défaut. Il vaut mieux présenter ces faits purement et simplement, quand ils ne choquent pas trop la raison, que de les passer sous silence; car il peut se faire que d'un instant à l'autre de nouvelles découvertes permettent de les expliquer.

Je crois devoir encore rapporter le tableau que Cavallo nous a laissé de plusieurs substances rangées suivant leurs facultés électriques de frottement.

	DEVIENT	FROTTÉ AVEC
Le poil de chat...	positif.......	toutes les substances qu'on a essayées jusqu'à présent.
Le verre poli.....	positif.......	toutes les substances, excepté le poil de chat.
Le verre dépoli...	positif.......	le taffetas ciré sec, le soufre, les métaux.
	négatif......	les étoffes de laine, les tuyaux de plume, le bois, le papier, la cire d'Espagne, la cire blanche, la main.
La tourmaline....	positive......	l'ambre, l'air injecté au moyen d'un soufflet.
	négative.....	le diamant, la main.
La peau de lièvre.	positive......	les métaux, la soie: l'aimant, le cuir, la main, le bois séché au four, le papier.
	négative.....	d'autres peaux plus fines.
La soie blanche...	positive.....	la soie noire, les métaux, le drap noir.
	négative.....	le papier, la main, les cheveux, la peau de belette.
La soie noire.....	positive.....	la cire d'Espagne.
	négative.....	les peaux de lièvre, de belette, et de furet, l'aimant, le laiton, l'argent, le fer, la main, la soie blanche.
La cire à cacheter.	positive.....	quelques métaux.
	négative.....	les peaux de lièvre, de belette, de furet, la main, le cuivre, les étoffes de laine, le papier, quelques métaux.
Le bois séché au four..........	positif.......	la soie.
	négatif......	la flanelle.

§ XVII. *Des effets électriques de frottement considérés comme effets électro-chimiques.*

75. Jusqu'ici nous avons considéré les effets électriques de frottement comme le résultat de l'ébranlement des particules des surfaces soumises à l'action mécanique; il s'agit de voir si, dans quelques cas, et peut-être dans le

plus grand nombre, on ne pourrait pas leur attribuer une origine chimique.

Nous ne savons pas encore au juste jusqu'à quel point les corps, en réagissant chimiquement les uns sur les autres, dans leur frottement mutuel, donnent naissance à des phénomènes électro-chimiques, qui ont des rapports plus ou moins directs avec les phénomènes électriques de frottement proprement dits. Cette question a besoin d'être examinée avant de passer outre.

Wollaston (1), désirant savoir si l'oxidation contribue au dégagement de l'électricité dans le frottement, monta, dans un vase où l'on pouvait changer l'air à volonté, un appareil électrique de frottement, formé d'un plateau de verre et de deux frottoirs enduits d'un composé métallique oxidable. Ayant électrisé le plateau dans l'air et dans un milieu rempli de gaz acide carbonique, il trouva que dans ce dernier cas tout développement d'électricité était suspendu.

Ce résultat attira peu l'attention, parce qu'à l'époque où il fut publié, on était loin d'attacher autant d'importance que maintenant aux effets électro-chimiques; cependant il était assez concluant, puisqu'il indiquait la nécessité d'une action chimique pour qu'il y ait dégagement d'électricité dans le frottement d'un plateau de verre et de deux coussins enduits d'un composé métallique oxidable.

76. Pour déterminer jusqu'à quel point les effets électriques de frottement peuvent dépendre de réactions chimiques produites dans le frottement même, il faut montrer quelle peut être la nature de ces réactions; car, dès l'instant qu'il sera démontré qu'il y a action chimique, la question sera résolue, puisqu'il n'y a pas d'actions de ce genre qui ne soient accompagnées d'effets électriques.

Si l'on porphyrise dans un mortier d'agate un cristal de mésotype, qui est un double de silicate de soude et d'alumine, la poudre jouit de la propriété alcaline à un

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XVI, p. 53.

degré assez marqué pour rougir le papier de curcuma. L'effet produit est dû à l'alcali mis en liberté par la trituration, et non à l'action de l'eau et des matières colorantes sur les parties très-divisées de la mésotype; car la poudre ne réagit plus à la manière des alcalis, aussitôt qu'elle a été lavée, à plusieurs reprises, avec de l'eau distillée. Toutes les laves et les substances qui renferment de la potasse ou de la soude se comportent de même.

Ce mode d'action est tel, qu'il peut être employé avec succès pour produire de doubles décompositions. Lorsque l'on passe rapidement, par exemple, un cristal de sulfate de potasse sur une plaque de calcaire, il y a aussitôt formation de sulfate de chaux et de carbonate de potasse, que les réactifs ordinaires reconnaissent aisément. Le sulfate de potasse et le carbonate de baryte donnent des effets qui sont bien marqués.

En broyant dans un mortier d'agate un fragment de pyrite de fer, non décomposable à l'air, il se forme du proto-sulfate de fer. Le deuto-sulfure d'étain, parfaitement neutre, donne naissance à un sous-sulfate d'étain, acide très-facile à reconnaître.

Ces trois exemples montrent, 1° que la porphyrisation, ou, ce qui revient au même, le frottement, peut, dans plusieurs cas, séparer les éléments des corps qui se trouvent combinés ensemble d'une manière intime; 2° qu'il peut s'opérer des doubles décompositions par le frottement mutuel de deux corps l'un contre l'autre; 3° que les sulfures des métaux oxidables se changent immédiatement en sulfate. D'après cela, dans l'examen des effets électriques de frottement, nous devons tenir compte de ceux qui proviennent des changements chimiques. Cette question sera traitée avec plus de développements dans le troisième volume. Mais nous croyons déjà pouvoir annoncer que le frottement, dans un grand nombre de cas, fait naître des réactions chimiques et que l'on a attribué quelquefois à des causes purement physiques des effets électriques qui ont une origine chimique.

§ XVIII. *Des effets électriques produits dans le contact des corps conducteurs.*

77. Volta, voulant combattre la doctrine de Galvani sur les contractions musculaires qui sont produites quand on met en communication les muscles et les nerfs d'une grenouille au moyen d'un arc composé de deux métaux différents, conçut l'idée qu'elles étaient dues à l'électricité qui se dégage au contact de ces deux métaux. Il admit aussitôt comme principe fondamental, que deux substances conductrices de l'électricité se constituent toujours dans deux états électriques contraires par leur contact mutuel, indépendamment de toute réaction chimique. Voici l'expérience à l'aide de laquelle il établit ce principe. Il prit deux disques circulaires, l'un de zinc et l'autre de cuivre, au centre desquels était fixée une tige en verre recouverte de vernis à la gomme laque; ayant mis ensuite en contact les disques en tenant dans chaque main une des tiges, il les sépara, et fit toucher l'un de ces disques à un des plateaux du condensateur, tandis qu'il touchait l'autre avec le doigt pour lui enlever son électricité. Il répéta plusieurs fois le contact des disques. Quand l'air au milieu duquel il opérait était très-sec, une dixaine de contacts suffisaient pour que les feuilles d'or divergeassent quand on enlevait le plateau supérieur. Le zinc donnait une charge d'électricité positive, et le cuivre une charge d'électricité négative.

Pour mettre encore plus en évidence ce principe, Volta fit l'expérience suivante : ayant soudé bout à bout une lame de zinc et une autre de cuivre, il prit la première entre les doigts et toucha le plateau supérieur du condensateur avec l'autre; un simple contact lui suffit pour donner à son appareil une charge sensible d'électricité. En répétant l'expérience d'une manière inverse, c'est-à-dire, tenant entre les doigts la lame de cuivre, et touchant l'un des plateaux du condensateur avec la lame de zinc, il n'eut aucune électricité, mais en inter-

posant une bande de papier mouillée entre le zinc et le condensateur, celui-ci prenait un excès d'électricité positive. Il tira la conséquence de ce fait, que la cause qui développe de l'électricité dans le contact agit comme une force attractive ou répulsive, qui agit du zinc sur le cuivre ou du cuivre sur le zinc, attendu que s'il n'en était pas ainsi, il serait impossible d'expliquer comment il y a équilibre entre les forces électriques quand une lame de zinc se trouve placée entre deux lames de cuivre; une des deux forces devait détruire l'effet de l'autre. Il a donné le nom de force électro-motrice à cette cause qui transporte ou repousse les deux électricités d'un métal dans l'autre. Tous les métaux dans leur contact mutuel jouissent des mêmes propriétés que le zinc et le cuivre, mais à des degrés plus ou moins marqués, suivant leur nature propre.

Volta trouva également qu'un métal et deux liquides hétérogènes, conducteurs de l'électricité, produisent le même effet que deux métaux différents et un liquide; que les sulfures alcalins et l'argent produisent autant d'effets que le zinc et l'argent; et qu'enfin, tous les corps de la nature donnent des effets électriques de contact à des degrés plus ou moins marqués, suivant leur faculté conductrice. Cet illustre physicien a encore découvert, et le fait est important, qu'en mettant en contact des disques de métal différent, les uns au bout des autres, on n'a jamais que les effets électriques dus au contact des deux métaux extrêmes.

Il a partagé en conséquence les corps en deux classes principales : dans la première, il a placé les corps conducteurs parfaits et secs, tels que les métaux et le charbon; dans la deuxième, les corps conducteurs imparfaits, comme les liquides, et les substances solides, qui ne sont conductrices qu'en raison des liquides qu'elles contiennent.

Une combinaison voltaïque est toujours formée de trois corps pris dans ces deux classes. Il a nommé combinaison du premier ordre, celle qui est formée de deux conducteurs parfaits avec un conducteur imparfait, comme le cuivre, le zinc et l'eau. La combinaison est

du second ordre quand il s'y trouve deux conducteurs imparfaits et un conducteur parfait.

78. Humphry Davy a donné un tableau dans lequel il indique les combinaisons les plus simples que l'on puisse former. Il les a rangées dans l'ordre de leur activité respective.

PREMIER ORDRE.

SUBSTANCES très-oxidables.	SUBSTANCES moins oxidables.	FLUIDES OXIDANTS.
Zinc	Avec or, charbon, argent, cuivre, étain, fer, mercure	Solutions aqueuses d'acides nitrique, muriatique ou sulfurique.
Fer	Avec or, charbon, argent, cuivre, etain	Eau tenant en dissolution de l'oxigène de l'air.
Étain	or, etain, charbon	Solution de nitrate d'argent et de mercure.
Plomb	or, argent	
Cuivre	or, argent	Acide nitrique, acide acétiq.
Argent	or	Acide nitrique.

SECOND ORDRE.

CONDUCTEURS parfaits.	CONDUCTEURS imparfaits.	CONDUCTEURS imparfaits.
Charbon	Solution des hydrosulfures alcalins, capables d'agir sur les trois premiers métaux, mais non sur les derniers.	solutions d'acides nitrique, chlorique, hydrochlorique, capables de réagir sur les métaux.
Cuivre		
Argent		
Plomb		
Étain		
Fer		
Zinc		

79. Volta a cherché à prouver que lorsqu'on emploie deux métaux et un corps humide, celui-ci n'agit seulement que pour transmettre les effets de contact. Conformé-

ment au même principe, dans la combinaison de deux liquides et d'un métal, l'un d'eux doit agir comme électro-moteur ; tandis que l'autre ne sert qu'à faciliter le transport de l'électricité dégagée au contact. Suivant la manière de voir de ce grand homme, les deux électricités dégagées restent en équilibre à la surface même de contact, sans pouvoir la franchir, malgré leur attraction réciproque pour former du fluide neutre; mais dès l'instant que l'une des deux électricités exerce son action sur les corps conducteurs en communication avec la terre, elle s'écoule aussitôt et l'autre devient libre.

Cette théorie fut assez généralement adoptée à l'instant où elle parut; mais quelques physiciens, à la tête desquels on doit mettre Fabroni, Parrot et Wollaston, attribuèrent une origine chimique à l'électricité qui se dégage au contact de deux métaux mouillés par un liquide, ou de diverses substances conductrices de l'électricité attaquées chimiquement par des agents extérieurs.

Dans le précis historique on a vu la discussion qui eut lieu à cet égard; ainsi je n'y reviendrai pas, afin d'exposer de suite les faits qui servent de base à la nouvelle théorie du contact. J'examinerai d'abord la production de l'électricité de tension dans le contact de deux corps solides, puis dans le contact d'un conducteur solide et d'un liquide.

80. Les actions chimiques donnant toujours lieu à un dégagement d'électricité, il est nécessaire de se mettre en garde autant que possible contre des effets de ce genre, dans les phénomènes qui nous occupent. On y parvient en partie en se servant, pour recueillir l'électricité, de plateaux conducteurs formés avec un métal non oxidable, semblables à ceux dont on a vu la description page 11, puisque l'on évite la réaction chimique du doigt mouillé sur le métal. D'un autre côté, l'air humide exerçant une action plus ou moins forte sur les métaux, suivant qu'ils sont plus ou moins oxidables, nous devons également nous en garantir : on y parvient au moyen de deux procédés. Le premier

consiste à opérer sur des substances minérales, conductrices de l'électricité, qui, exposées depuis des siècles aux intempéries des saisons, n'ont éprouvé aucune altération sensible, comme le platine, l'or, le peroxide de manganèse, le fer oxidé magnétique, le fer oligiste, le mercure argental, le persulfure de fer, non altérable à l'air, le cuivre gris, le cuivre sulfuré, le protoxide de cuivre cristallisé, le carbure de fer, le cobalt gris, le deutoxide de fer, etc.

Les doigts ayant été lavés avec de l'eau distillée, et s'étant assuré que les plateaux d'or ou de verre doré ne possèdent aucun résidu électrique, on place sur l'un des plateaux une bande de papier joseph humide, et dessus le corps qui doit être mis en contact avec celui que l'on tient entre les doigts.

On trouve d'abord que le platine et l'or ne donnent jamais lieu à un dégagement d'électricité par leur contact mutuel, quelque grande que soit la sensibilité de l'électroscope employé. Si donc Volta en a trouvé en opérant avec des plateaux de cuivre, on doit l'attribuer à la réaction du liquide qui adhérait à son doigt sur le cuivre. Nous avons vu aussi qu'il y a absence d'effets électriques, quand on plonge une lame d'or et une autre de platine, en communication avec un multiplicateur, dans un liquide qui ne les attaque pas. Ces deux faits sont importants à noter.

D'un autre côté, le platine et l'or sont positifs par rapport au peroxide de manganèse et au carbure de fer, et ne donnent aucun effet avec le protoxide de cuivre, le persulfure de fer, le deutoxide de fer préparé avec l'eau, le fer oligiste, etc. Le peroxide de manganèse et le carbure de fer sont négatifs au contraire par rapport à ces substances. Les effets obtenus avec le peroxide et le deutoxide de fer, ou le persulfure de même métal, sont bien marqués. En général, le peroxide de manganèse est négatif par rapport à tous les corps soumis à l'expérience. Doit-on admettre que le contact du peroxide de manganèse avec le doigt mouillé ou le papier humide donne lieu

à une réaction chimique, à laquelle doit être attribué l'effet électrique observé? C'est une question que nous devons examiner préalablement.

On sait 1° que le peroxide de manganèse est décomposé par les acides avec dégagement de gaz oxigène; 2° qu'il abandonne également ce gaz à l'aide de la chaleur pour passer à un degré inférieur d'oxidation; 3° qu'il se transforme dans certains cas en hydrate, en perdant une partie de son oxigène, surtout quand il est en contact avec des corps organisés. Ne se passerait-il pas un effet de ce genre dans le cas qui nous occupe, par suite du contact de ce corps avec le doigt ou le papier? Cela pourrait être; j'en ai douté long-temps: mais depuis mes recherches sur les effets chimiques de frottement, je commence à croire que cette explication est admissible. Pour rendre compte des effets observés, il faudrait que le peroxide de manganèse, pendant qu'il perd son oxigène en s'hydratant, prît l'électricité positive, attendu que les effets électriques, dans les décompositions, sont toujours inverses de ceux que l'on observe dans les combinaisons; or, c'est précisément ce qui arrive ici, comme on peut le voir en analysant les phénomènes qui ont été décrits.

Le cobalt gris et l'or donnent des effets assez bien marqués. Le premier est négatif, et le second positif; avec le platine ils le sont moins. Jusqu'ici nous ignorons si le cobalt éprouve une altération quelconque au contact de l'eau et des matières organiques. Enfin, le deutoxide de fer, préparé avec la vapeur d'eau, est positif par rapport au cobalt gris. Je pourrais rapporter encore d'autres exemples dans lesquels il est difficile de reconnaître des traces de réactions chimiques, et où l'on est porté à admettre l'influence du contact.

81. Le second procédé, à l'aide duquel on rend sensibles les effets électriques de contact, donne des résultats plus concluants que les précédents. On prend, pour plateau supérieur d'un condensateur, un disque en zinc recouvert partout de plusieurs couches de vernis à la gomme

laque, excepté dans deux parties, à l'une desquelles on soude une tige de platine, et dont l'autre est recouverte exactement d'un disque de verre, afin que le zinc ne se trouve nulle part en contact avec l'air. L'appareil est placé dans une cage de verre où se trouve de la chaux vive.

Le plateau inférieur du condensateur étant d'or, le plateau supérieur de zinc, si l'on touche le premier, d'une part avec le doigt mouillé, de l'autre la tige de platine fixée au second également avec un doigt mouillé, on trouve, en enlevant le plateau supérieur, que l'appareil s'est chargé d'électricité négative. Le platine, dans son contact avec le zinc, a donc pris l'électricité négative, indépendamment de l'action de l'air sur ce dernier. Peut-être objectera-t-on que l'air humide agit encore, quoique faiblement, sur le zinc à travers quatre ou cinq couches de vernis appliquées sur la surface : c'est un fait que M. Delarive a essayé de démontrer, et sur lequel nous reviendrons dans un instant.

Si l'on touche maintenant avec le doigt mouillé la partie découverte du plateau de zinc au lieu de la tige de platine, l'appareil prend une charge d'électricité positive, comme on devait s'y attendre, en raison de la réaction du zinc sur le liquide adhérent au doigt. Ces résultats, s'ils ne proviennent pas de la réaction de l'eau et de l'air sur le zinc, par l'intermédiaire des couches de vernis qui ont été appliquées sur la surface, doivent-ils être attribués uniquement au contact du platine et du zinc, ou à d'autres réactions, telles que celles qui ont lieu de la part de l'eau sur les substances acides ou alcalines qui transpirent par les pores de la peau. C'est là où en est ramenée la question du contact.

M. Peltier a répété l'expérience rapportée plus haut d'une manière qui en rend le résultat plus évident. Il prend deux disques, *c* et *z*, l'un de cuivre et l'autre de zinc, soudés à une tige *ab* en cuivre (fig. 42). Il soude également sur le disque *c* une autre tige *m* en platine, et une tige *n* à un autre disque *c'* en cuivre, qui est vissé à la partie supérieure

d'un électroscope. Toutes les parties de cet appareil, à l'exception des tiges de platine, sont recouvertes de plusieurs couches de vernis à la gomme laque. Il pose d'abord z sur c', et met en communication m et n avec un fil de platine : en touchant le plateau inférieur c' avec le doigt, l'appareil se charge d'électricité négative; quand on pose au contraire c sur c', il n'y a aucun effet de produit : le condensateur ne fonctionne pas. Cette expérience tend à prouver comme ci-dessus que le contact du cuivre et du zinc produit un dégagement d'électricité, independamment de toute réaction chimique.

82. Jusqu'ici il n'a été question que d'effets électriques de contact dont l'origine chimique est pour le moins douteuse; nous allons nous occuper actuellement des effets dont l'orignie chimique est incontestable. Cette question a été traitée à plusieurs reprises par M. Delarive avec beaucoup de sagacité. La méthode expérimentale dont il a fait usage consiste à prendre, comme l'a fait Volta, une plaque composée de deux lames, l'une de zinc, l'autre de cuivre, soudées ensemble par un de leurs bouts, et à tenir l'un des métaux avec la main, tandis que l'on touche le condensateur avec l'autre. Il ne faut pas perdre de vue l'action chimique qu'exercent sur la surface du zinc l'humidité de la main et celle du conducteur, qui est interposé entre le zinc et le plateau du condensateur.

M. Delarive, pour prouver que le phénomène est purement chimique, a cherché à faire disparaître toute espèce d'action chimique sur le zinc. Au lieu de tenir ce métal entre les doigts, il l'a inséré dans une pince de bois très-sec, et l'a placé dans le vide ou un air très-desséché. Quand le bois touchait avec le sol, on n'observait aucun signe d'électricité; mais aussitôt que l'on humectait la pince ou que l'on entourait le zinc d'air humide, de chlore ou de vapeurs acides, l'électricité reparaissait avec force. Il en a tiré la conséquence que c'est à l'action chimique et non au contact qu'est dû le développement de l'électricité. Dans la théorie de

Volta on rend compte des effets observés, en disant que le bois sec, n'étant pas conducteur de l'électricité, ne peut donner écoulement à l'électricité positive du zinc, mais que dès qu'il est conducteur, la charge doit s'effectuer.

Le savant Génevois a été frappé surtout des résultats qu'il a obtenus en employant le potassium et le sodium.

Un morceau de l'un de ces deux métaux ayant été fixé à une pince de platine par l'une de ses extrémités, tandis qu'on le tenait par l'autre extrémité au moyen d'une pince d'ivoire, on l'entoura d'huile de naphte très-pure, et on toucha le condensateur avec le bout d'une pince de platine, il n'y eut aucun signe d'électricité; mais aussitôt que l'huile de naphte fut enlevée, et que l'air put réagir sur le métal, l'électricité dégagée fut des plus vives.

M. Delarive a cherché à combattre l'objection qu'on lui a faite, que le bois sec, n'étant pas conducteur de l'électricité, le condensateur ne pouvait se charger. Il a fait à ce sujet l'expérience suivante. Il prit un cylindre d'ébène de 10 à 12 centimètres de longueur et de 2 de diamètre; l'ayant desséché fortement, il inséra à chacune de ses extrémités deux petites boules de zinc, terminées par des bouts de laiton. La partie extérieure du zinc, ainsi que les extrémités du cylindre d'ébène, étaient recouvertes d'une couche de cire, qui interceptait l'action de l'air humide. En tenant à la main le bout de laitou d'une des deux lames de zinc, et en touchant le condensateur avec l'autre bout, on n'obtenait aucun signe d'électricité: cet effet se conçoit parfaitement dans la théorie de Volta. Ayant retiré ensuite une des lames de zinc, il l'humecta légèrement avant de l'introduire de nouveau dans la fente pratiquée dans l'ébène; dans ce cas il eut des signes électriques très-prononcés. L'électricité développée était négative quand le bout de laiton, mis en contact avec le condensateur, était celui qui était soudé à la lame humectée, et positive quand c'était le bout tenant à la lame non humectée. M. Delarive en a

conclu que son appareil était conducteur de l'électricité d'un bout à l'autre; que l'électricité dégagée ne provenait que de celle des lames qui avait éprouvé une action chimique par l'effet de l'humidité dont elle avait été recouverte; enfin, que l'effet ne pouvait être attribué au contact. Les défenseurs du contact et les partisans de l'origine chimique diront que, dans le premier cas, la tension électrique pouvait être la même aux deux bouts, tandis que, dans le second, elle était plus considérable d'un côté que de l'autre en raison de l'action chimique. M. Pfaff, qui depuis la découverte de Volta n'a cessé de défendre la doctrine du contact, a cherché, depuis les recherches de M. Delarive, à ajouter de nouvelles preuves à celles qu'il avait données précédemment (1). Il prit un condensateur composé d'un disque de zinc et d'un disque de laiton, enduits tous les deux d'une couche mince de vernis de succin, et dont l'un était vissé sur l'électroscope à feuilles d'or. En établissant un contact métallique entre les deux disques, il trouva, après leur séparation, que celui de zinc était chargé d'électricité positive, et celui de cuivre d'électricité négative. Il observa que le résultat était encore de même en opérant dans le vide, dans l'air bien desséché, dans l'azote, dans l'hydrogène et d'autres gaz, qui ne peuvent exercer aucune action chimique sur le zinc: il en tira dès lors la conséquence que l'effet électrique ne pouvait être attribué qu'au contact des deux métaux.

83. M. Delarive a combattu les conséquences que M. Pfaff a tirées de ses expériences. Il observe d'abord qu'en se servant d'un condensateur composé de deux disques hétérogènes, il peut arriver que l'électricité développée soit due à la pression des deux plateaux sur la couche mince de vernis qui les sépare. Nous ne concevons pas un effet de ce genre, quand le vernis a été appliqué à chaud et adhère fortement au métal. Il se demande ensuite

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XLVI, p. 286.

quelle certitude on peut avoir que, soit dans le vide, soit dans les gaz, où le condensateur était placé, il n'y ait pas de trace d'humidité. Or, il suffit, ajoute-t-il, d'une légère action chimique, exercée sur la surface par l'air ou par le milieu ambiant quelconque, pour déterminer le dégagement d'électricité observé.

Il a cherché à démontrer ensuite que c'est bien à l'action chimique qu'est dû le développement de l'électricité dans l'expérience du condensateur formé de deux disques hétérogènes. Il a pris deux disques de zinc semblables, pour les dimensions, aux deux disques en laiton d'un condensateur; il a soudé à chacun un bout de laiton, puis il a recouvert leur surface intérieure d'une couche mince de vernis de gomme laque, afin de les transformer en plateau d'un condensateur. Il a recouvert aussi entièrement d'une couche de même vernis la surface extérieure de l'un des disques de zinc, afin de lui enlever le contact immédiat avec l'air. Il a fait diverses expériences en formant le condensateur, tantôt avec les deux disques de zinc, tantôt seulement avec l'un d'eux et avec un disque de laiton.

Quand il se servait du disque de zinc, dont la surface était recouverte partout de vernis, il obtenait des résultats électriques moins marqués qu'avec l'autre. Ayant présumé que l'électricité très-faible qui était développée avec le plateau de zinc verni, provenait de ce que la couche dont il était recouvert était trop mince pour intercepter complétement toute action chimique de l'air et de l'humidité, il augmenta successivement l'épaisseur de la couche, jusqu'à ce que le plateau cessât de donner des signes d'électricité. Il en conclut que l'air humide exerçait son action sur la surface du zinc, au travers du vernis, et que, lorsqu'un plateau de zinc est mis entièrement à l'abri de cette action, au moyen d'une couche de vernis, il ne devient point électrique dans son contact avec une tige de laiton. Dans ce cas, ce plateau se conduit comme un plateau homogène de laiton; car si l'on touche le laiton, qui est soudé à la surface du zinc, avec le cuivre d'un couple voltaïque,

on lui communique l'électricité négative. On obtient le même résultat en mettant en communication les deux bouts de laiton. Il s'agirait d'examiner si en augmentant le nombre des couches de vernis, on ne diminue pas la faculté condensante des plateaux au point de l'annuler tout-à-fait.

Le plateau inactif de zinc, mis en communication avec différentes sources d'électricité, se charge d'électricité négative, comme d'électricité positive. M. Delarive a reconnu que dans les mêmes circonstances et avec le même appareil, le plateau inactif cuivre-zinc du condensateur se charge plus facilement et en plus grande quantité d'électricité positive que d'électricité négative.

On savait que l'électricité, lorsqu'elle est très-faible, éprouve un obstacle dans sa transmission, quand elle passe d'un conducteur dans un autre. M. Delarive chercha à découvrir si l'obstacle était plus ou moins grand, suivant l'ordre dans lequel les deux conducteurs se succéderaient l'un à l'autre. Il découvrit que l'électricité positive passe plus facilement du cuivre au zinc que du zinc au cuivre, et que c'est l'inverse pour l'électricité négative. Cette propriété remarquable des conducteurs hétérogènes peut servir à expliquer des anomalies que présentent quelques phénomènes électro-chimiques dont je vais parler dans un instant.

84. M. Delarive, prenant en considération les recherches que j'ai faites sur les phénomènes thermo-électriques, a examiné quelle était l'influence de l'action calorifique sur la production de l'électricité de tension dans le contact de deux corps solides hétérogènes. Ayant soudé à l'un des plateaux du condensateur en zinc une petite tige de platine, et ayant recouvert ce plateau sur toute sa surface d'une couche épaisse de vernis, il s'apercut que la plus petite élévation de température opérée sur l'extrémité de la tige de platine, donnait des signes électriques; le plateau de zinc acquérait une petite charge d'électricité positive. Il observa en outre qu'il n'y avait aucun effet de produit lorsqu'on avait

le soin d'éviter toute élévation de température. M. Delarive pense qu'il est prouvé par cette expérience que l'action calorifique peut donner naissance aussi bien à une tension qu'à un courant électrique, et que par conséquent on a pu attribuer, dans certains cas, au contact de deux substances hétérogènes, un développement d'électricité qui n'était dû réellement qu'à l'action calorifique. Nous partageons entièrement son opinion à cet égard.

Nous devons conclure de tous les phénomènes électriques qui ont été observés jusqu'ici dans le contact des corps, que, dans presque tous les cas, il y a eu action chimique, et que dès lors on est porté à croire que cette dernière cause est celle qui exerce le plus d'influence sur leur production. Néanmoins, dans l'état actuel de la science, on ne doit pas encore abandonner la théorie de Volta, attendu qu'il peut très-bien se faire qu'au contact de deux corps il y ait un dégagement d'électricité résultant d'un commencement de réaction chimique entre ces corps.

§ XIV. *De l'électricité de tension dans les actions chimiques.*

85. M. Delarive s'est rendu compte des causes qui font varier l'intensité des effets électriques produits dans les actions chimiques, en partant de ce principe, que les deux électricités dégagées se recombinent immédiatement après leur séparation en plus ou moins grande proportion, suivant la conductibilité des corps soumis à l'expérience.

Si l'on met dans une capsule de platine de l'acide sulfurique étendu d'eau, ou de l'acide nitrique, et qu'on y plonge une lame de zinc ou de fer, l'action est très-vive, et il doit en résulter un dégagement d'électricité considérable. Dans ce cas, il y a recomposition immédiate d'une grande partie des deux fluides, au contact même du métal et du liquide. En mettant au contraire dans la capsule de l'eau pure ou de l'acide sulfurique concentré deux liquides qui conduisent médiocrement l'électri-

cité, l'action chimique est très-faible, et les deux fluides dégagés dans cette circonstance ne se recombinent que dans une faible proportion; aussi peut-on en accumuler une quantité notable sur le condensateur. La conductibilité électrique joue donc ici un grand rôle dans les phénomènes de recomposition.

M. Delarive pense que l'on ne doit jamais perdre de vue, dans l'appréciation des effets électriques qui se manifestent dans l'action d'un liquide sur un métal, le principe de la transmission plus ou moins facile des deux principes électriques, selon la nature relative des conducteurs.

Lorsque l'on plonge, dans de l'acide sulfurique concentré, contenu dans une capsule de platine en communication avec l'un des plateaux du condensateur, des substances non métalliques, telles que du bois, du liége, de la cire, etc., l'acide sulfurique prend l'électricité positive; quant à l'électricité négative, l'imparfaite conductibilité des substances l'empêche de sortir par la main et de neutraliser en entier l'électricité positive de l'acide.

Si donc l'on diminue la facilité qu'éprouvent les deux principes électriques à se recombiner immédiatement après leur séparation, on obtient des effets électriques qui sont assez forts pour être rendus sensibles au moyen de l'électroscope à feuilles d'or. On en a un exemple en chauffant fortement un creuset de métal et en jetant dedans quelques gouttes d'un liquide capable de l'attaquer; ce liquide réagit plus fortement que si le métal était froid. En se vaporisant, il emporte avec lui l'électricité positive, tandis que le métal conserve l'électricité négative qu'il avait prise, et qui ne peut se recombiner avec l'autre. Dans le cas où la quantité de liquide est trop considérable et que la vaporisation n'est pas assez forte, l'effet est presque nul, parce que toute l'électricité positive, n'étant pas emportée par la vapeur, se recombine avec l'électricité négative du métal.

Ce procédé pour obtenir de l'électricité de tension dans les actions chimiques est le plus favorable de tous

ceux que l'on puisse employer, en raison de la difficulté que l'on oppose à la recomposition des deux principes électriques.

§ XV. *Du Dégagement de l'électricité par l'influence des courants électriques.*

86. Les premières tentatives qui ont été faites pour essayer de produire des courants électriques par l'influence d'autres courants, sont dues à M. Ampère. Il forma une spirale avec un fil de cuivre recouvert de soie, et fit passer, par une ouverture pratiquée dans la partie supérieure, un fil de soie auquel était suspendu un disque de cuivre, que l'on maintenait pendant quelques instants dans le sens des circonvolutions. Ayant fait passer la décharge d'une forte pile voltaïque dans la spirale, il remarqua qu'en plaçant le disque entre les pôles opposés d'un aimant à fer à cheval, celui-ci exerçait une action sensible, qui variait suivant la position des pôles. M. Ampère se borna à constater le fait sans l'analyser. M. Faraday a repris cette question, l'a traitée à fond, et tous les faits qu'il a observés constituent maintenant une branche importante de l'électricité. Nous ne pouvons mieux faire que de le prendre pour guide dans l'exposé que nous allons présenter des courants électriques produits par influence d'autres courants et du dégagement de l'électricité produit également par l'influence des aimants.

M. Faraday appelle *induction* le pouvoir que possèdent les courants électriques d'exciter dans la matière, qui est dans leur sphère d'activité, un état particulier quelconque qui produit d'autres courants.

87. Pour mettre en évidence l'induction, il enroule en spirale, sur un cylindre de bois, deux fils de cuivre semblables, recouverts de soie, de deux ou trois cents pieds de longueur. Une de ces spirales est mise en communication avec un multiplicateur, et l'autre avec une pile à la Wollaston de cent couples, de quatre pouces carrés, et bien chargée; il y a aussitôt une légère dé-

viation dans l'aiguille, qui cesse immédiatement après. Un autre effet se produit, mais en sens contraire, aussitôt que le contact avec la pile est interrompu : les effets d'induction n'ont donc lieu qu'à l'instant où commence et cesse le courant. Il en conclut sur-le-champ que ce courant, qui n'a qu'une existence instantanée, participe plus de la nature du courant électrique produit par le choc de la bouteille de Leyde, que de celui qui prend naissance dans l'action de la pile.

Il trouva ensuite que le courant induit, produit par l'action du courant inducteur, est dirigé dans une direction contraire, et que celui qui a lieu par la cessation du courant inducteur, chemine dans la même direction que lui.

§ XVI. *Du Dégagement de l'électricité par l'action des aimants.*

88. Nous savons qu'un courant électrique qui parcourt un fil de métal jouit de la propriété d'exercer sur l'aiguille aimantée une action qui semble révolutive. M. Ampère ayant conçu l'idée que les aimants étaient produits par des courants électriques, démontra par le calcul, que l'on pouvait considérer effectivement les premiers comme formés de courants électriques tournant autour de leurs molécules, dans une direction perpendiculaire à leur axe.

M. Faraday, aussitôt qu'il eut découvert la production des courants par l'influence d'autres courants, chercha si les aimants ne produiraient pas des effets semblables. L'expérience vint confirmer ses prévisions ainsi que la théorie de M. Ampère.

Il prit un anneau de six pouces de diamètre extérieur (fig. 43), formé avec une barre ronde de fer de $\frac{7}{8}$ de pouce d'épaisseur, et enroula en spirale autour de la partie A trois fils de cuivre recouverts de soie, de vingt-quatre pieds de longueur chacun, lesquels pouvaient être employés séparément ou ensemble, en laissant les bouts

libres ou les réunissant. Il appliqua de la même manière, de l'autre côté B de l'anneau, soixante pieds du même fil, dirigé dans le même sens que le premier.

Il mit en rapport la spirale B avec un multiplicateur, et les fils de A ayant été réunis bout à bout à leurs extrémités, furent mis en communication avec une pile de dix couples de quatre pouces carrés. L'aiguille aimantée fut alors déviée, et beaucoup plus que lorsqu'on employait une pile de force décuple avec des spirales sans anneau de fer. L'effet de même ne fut pas permanent, car l'aiguille reprit aussitôt sa position naturelle d'équilibre. En interrompant le contact avec la batterie, l'aiguille fut déviée aussi fortement, mais dans une direction contraire à celle qu'elle avait prise quand le courant fut établi.

Il remarqua également que l'aiguille aimantée du multiplicateur se déviait d'un côté ou de l'autre, suivant que les extrémités du fil de A communiquaient avec l'un ou l'autre des pôles de la pile.

Toutes les fois qu'il employait une pile énergique, de cent couples par exemple, l'action produite était si énergique, que l'aiguille aimantée tournait rapidement quatre ou cinq fois sur elle-même, avant d'osciller pour reprendre sa position ordinaire d'équilibre.

En plaçant un morceau de charbon bien recuit et effilé à chacune des extrémités de la spirale B, et rapprochant les deux bouts effilés de manière à les mettre en contact, il aperçut une petite étincelle électrique, aussitôt que la communication fut établie. Rarement il put voir l'étincelle quand le contact avec la pile cessait. Il forma, sur un cylindre creux de carton, huit spirales avec deux cent vingt pieds de fil de cuivre recouvert de soie. Quatre d'entre elles, réunies bout à bout, furent mises en communication avec le multiplicateur, et dans les quatre autres, également jointes ensemble, on fit passer la décharge d'une pile de cent couples. L'aiguille aimantée éprouva une action à peine sensible; mais aussitôt qu'on eut introduit dans le tube de carton un

cylindre de fer doux, l'aiguille aimantée fut fortement affectée. Un cylindre de cuivre fut absolument sans action.

89. Il obtint de semblables effets avec les aimants ordinaires. Ayant mis en communication avec le multiplicateur toutes les spirales élémentaires de la spirale creuse dont on vient de parler, il y introduisit le cylindre de fer doux, et arrangea deux barreaux aimantés, de manière que d'un côté leurs pôles opposés fussent mis en contact entre eux, et de l'autre avec les deux bouts du cylindre de fer, pour le transformer en un aimant. Au moment où le contact fut opéré, l'aiguille aimantée fut déviée; elle reprit, après quelques oscillations, sa position ordinaire d'équilibre, et se dévia de nouveau dans une direction contraire, lorsque l'on retira les aimants. En renversant les contacts magnétiques, les déviations de l'aiguille furent aussi changées.

Il observa, au moyen de la déviation de l'aiguille aimantée, que le courant secondaire qui est produit par influence a une direction contraire au courant qui aurait été employé pour développer dans le fer doux un magnétisme de la même polarité que le magnétisme réellement produit par le contact avec les barreaux aimantés. M. Faraday expérimenta ensuite avec le grand aimant de la Société royale de Londres, qui est formé d'environ quatre cent cinquante barres aimantées, dont chacune est longue de quinze pouces, large d'un pouce, et de l'épaisseur d'un demi-pouce. Il est disposé dans une boîte, comme l'indique la figure 44, de manière à présenter à l'une de ses extrémités deux pôles extérieurs, qui débordent la boîte de six pouces. Il faut une force de près de cent livres pour rompre le contact d'un cylindre de fer doux qu'on applique dessus. Voici les principaux résultats que M. Faraday obtint avec cet aimant. Il mit en contact avec les deux pôles un cylindre de fer doux, long de treize pouces, placé dans la spirale creuse qui a été décrite, et dont les bouts réunis en deux extrémités avaient été mis en communication avec le

galvanomètre. Le dégagement d'électricité fut si considérable, que l'aiguille aimantée fit de suite plusieurs révolutions sur elle-même. Il obtint avec cet appareil, à l'intensité près, tous les effets qui ont été décrits précédemment.

Il se borna ensuite à faire passer les fils du multiplicateur sur la barre de fer A B : l'aiguille aimantée fut de même puissamment affectée, chaque fois que le contact magnétique était établi ou rompu.

Les effets furent également très-puissants lorsque la spirale et son cylindre de fer étaient placés à peu de distance des pôles. L'effet variait naturellement suivant la distance.

Les expériences précédentes sont les premières qui aient été faites pour obtenir de l'électricité avec un aimant.

Nous avons passé en revue toutes les causes qui troublent l'équilibre du principe électrique dans les corps; la question du dégagement de l'électricité est d'une telle importance pour établir les rapports qui existent entre les forces électriques et les forces qui constituent les affinités et l'agrégation, que nous avons cru devoir la traiter avec tous les détails possibles.

CHAPITRE IV.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

§ Ier. *Des lois suivant lesquelles agissent les attractions et répulsions électriques.*

90. APRÈS avoir exposé avec de grands développements les phénomènes relatifs au dégagement de l'électricité, nous allons reprendre les propriétés générales de chacun des deux fluides, lorsqu'ils sont en équilibre sur la surface des corps.

Quand un corps est électrisé, il jouit de la propriété d'attirer les corps légers qu'on lui présente. L'attraction est d'autant plus forte, que les corps sont plus rapprochés ; mais quelle loi suit-elle en raison de la distance? Cette question a été résolue complétement par Coulomb, à l'aide de la balance de torsion, dont on a donné la description (fig. 7).

On commence d'abord par mettre l'index du micromètre de torsion à zéro, et l'on tourne la pince à laquelle est attaché le fil de métal, jusqu'à ce que le disque de clinquant vienne se placer au zéro de l'échelle tracée sur le pourtour de la cage. On prend ensuite un second disque, qui est fixé à l'extrémité d'un cylindre très-fin de gomme laque, et dont la longueur est telle, qu'en l'introduisant dans l'intérieur de la cage, il vienne se placer au niveau et vis-à-vis de l'autre, au zéro de l'échelle de la cage.

Si l'on touche l'un des deux disques avec un petit corps faiblement électrisé, tel qu'une épingle enfoncée dans un bâton de gomme laque, celui qui est mobile est

chassé aussitôt, et après quelques oscillations, il s'arrête à un certain point. L'angle de torsion mesure la force en vertu de laquelle la répulsion s'est opérée.

Voici les résultats d'une des expériences de Coulomb.

L'angle de torsion étant de 36 degrés, il tordit le fil de suspension en sens contraire de la répulsion, pour rapprocher l'aiguille jusqu'à 18 degrés de la boule fixe : il fut obligé, pour cela, de tourner l'index du micromètre de 126 degrés. Pour la ramener à 8 degrés et demi, il fallut tourner le micromètre, toujours en sens inverse de la répulsion, de 567 degrés.

Coulomb s'était assuré que pendant la durée des expériences ce jour-là, les boules n'avaient pas perdu une quantité sensible d'électricité, soit par le contact de l'air, soit par les supports.

Ces résultats suffisent pour déterminer la loi suivant laquelle s'opèrent les répulsions électriques.

ARC DE DISTANCE des deux boules.	ANGLE DE TORSION. nécessaire pour ramener la distance indiquée ci-joint.
36°	.... 36°
18°	.... 126°
8° $\frac{1}{2}$	.... 567°

En discutant les résultats consignés dans ce tableau, on voit que lorsque les deux disques sont éloignés de 36 degrés, la force répulsive est contre-balancée par une torsion d'un même nombre de degrés exercée dans le sens de l'arc. Dans le second cas, lorsqu'on a tordu le fil de 126 degrés pour amener le disque à 18 degrés, la force répulsive des deux boules a fait équilibre à une torsion de 126 degrés + 18. Enfin,

dans le troisième cas, quand on a tourné l'index du micromètre de 567 degrés pour ramener le disque à 8 degrés et demi du disque fixe, la force répulsive qui le maintenait à cette distance a fait équilibre à une torsion de 567 degrés + 8 degrés et demi. On en déduit :

ARC DE DISTANCE des deux boules.	MESURE de la force répulsive de la torsion.
36°	36°
18°	144°
8° $\frac{1}{2}$	575° $\frac{1}{2}$

Ces résultats nous prouvent que lorsque les arcs de distance sont entre eux comme les nombres $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$, les torsions correspondantes qui mesurent les effets des forces répulsives croissent comme les nombres 1, 4, 16; c'est-à-dire, que les répulsions électriques sont en raison inverse du carré de la distance. Or, cette loi est précisément celle qui régit l'attraction des corps célestes. On commet une erreur en prenant pour la distance des deux disques, l'arc qui joint les centres, car la véritable distance est la corde qui joint les deux extrémités de l'arc. Mais cette erreur est très-faible quand les arcs sont peu étendus, puisque la corde se confond sensiblement avec l'arc. Le fil d'argent dont Coulomb a fait usage avait 28 pouces de longueur, et ne pesait que $\frac{1}{16}$ de grain.

91. Lorsque Coulomb a voulu se servir du même moyen pour déterminer la loi de l'attraction de deux disques chargés d'une électricité de nature différente, il a trouvé un inconvénient qui l'a forcé de modifier le mode d'expérimentation. Cette difficulté tient à ce que, lorsque

les deux balles se rapprochent en s'attirant, la force d'attraction qui croît, comme on va le voir, dans le rapport de la raison inverse du carré des distances, croît souvent dans un plus grand rapport que la force de torsion; de sorte que l'on éprouve des difficultés à empêcher que les balles ne se touchent. Il a donné un calcul pour faire voir en quoi consistent les difficultés de l'opération, et montrer en même temps les limites dans lesquelles il faut renfermer les expériences pour en assurer le succès (1). En suivant la théorie qu'il a donnée, il est parvenu à mettre en équilibre, à différentes distances, la force attractive de deux balles électrisées au moyen de la force de torsion du fil. En comparant ensuite les diverses expériences, il en a conclu que la force attractive des deux balles électrisées différemment était en raison inverse du carré de la distance. Coulomb ne s'en est pas tenu à ce résultat déduit du calcul, il a voulu également le déterminer par une méthode expérimentale.

Cette méthode consiste à suspendre une aiguille horizontalement, dont l'extrémité seule est électrisée, et qui, présentée à une certaine distance d'un globe électrisé d'une nature différente, est attirée et oscille en vertu de l'action de ce globe. On détermine ensuite, par la formule du pendule, la force attractive à diverses distances.

Voici une application de cette méthode. Le globe G, dont il a fait usage, avait 1 pied de diamètre; la petite plaque *l*, fixée à l'extrémité d'une aiguille de gomme laque de 15 pouces de longueur, avait 7 lignes. Le fil de suspension était un fil de soie tel qu'il sort du cocon, de 8 lignes de longueur. La plaque fut éloignée successivement à 0, 3, 6, etc. pouces. Le globe ayant été électrisé positivement et la plaque négativement, il obtint les résultats suivants :

(1) Mémoires de l'Acad. des Sc., 1785, p. 579.

1er Essai.

La plaque l placée à 3 pouces de distance de la surface du globe, ou à...... 9 de son centre, a donné 15 oscillations en... 20″

2e Essai.

La plaque l éloignée de 18 du centre du globe, a donné.................... 15 oscillations en... 40″

3e Essai.

La plaque l éloignée de 24 du centre du globe, a donné.................... 15 oscillations en .. 60″

En désignant par φ la force, T le temps d'un certain nombre d'oscillations, T sera proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{\varphi}}$; mais si d est la distance du centre du globe au centre de la plaque, et que les forces attractives soient proportionnelles à l'inverse du carré des distances, ou à $\frac{1}{d^2}$, il en résulte que T sera proportionnel à la distance. En faisant donc varier celle-ci, le temps d'un même nombre d'oscillations devra être comme la distance de la plaque au centre du globe. En comparant cette théorie avec l'expérience, on a :

1er Essai. — Distance des centres. 9 p. 15 oscillations en 20″
2e Essai. — .... 18 .... 41″
3e Essai. — .... 24 .... 60″

Les distances sont comme les nombres .... 3. 6. 8.
Les temps d'un même nombre d'oscill. .... 20. 41. 60.
Par la théorie ils auraient dû être......... 20. 40. 54.

On voit que dans ces trois essais la différence entre la théorie et l'expérience est de $\frac{1}{10}$ pour le dernier essai comparé au premier, et est presque nulle pour le second comparé au premier. Mais il faut remarquer qu'il a fallu à peu près quatre minutes pour faire les trois essais, et que, quoique l'électricité se perdît lentement ce jour-là, elle perdait cependant encore $\frac{1}{48}$ d'action par minute.

Il est donc complétement démontré que les attractions et répulsions électriques s'exercent en raison inverse du carré de la distance.

§ II. *De la quantité d'électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné par le contact de l'air plus ou moins humide, et le long des supports plus ou moins* isolants.

92. Un corps conducteur électrisé et isolé perd assez rapidement son électricité par son contact avec l'air. Coulomb a déterminé, par l'expérience, les lois suivant lesquelles s'opère cette déperdition, dont la connaissance est indispensable lorsqu'on veut soumettre au calcul les phénomènes électriques de tension.

Deux causes influent sur la perte de l'électricité : la première, est la nature des supports qui n'isolent jamais parfaitement; la seconde, l'air qui, étant toujours chargé d'humidité, dépose une petite couche d'eau hygrométrique sur les supports et les rend conducteurs. De plus, un corps électrisé est enveloppé par l'air atmosphérique, qui est plus ou moins isolant, suivant la nature de ses parties constituantes et leur affinité pour les molécules aqueuses. Un corps conducteur se chargeant toujours d'une partie de l'électricité du corps qu'il touche, et en étant repoussé aussitôt, il en résulte que chaque molécule de l'air qui touche un corps électrisé, se charge plus ou moins rapidement de l'électricité de ce corps. Une molécule de l'air étant chargée d'électricité, est chassée aussitôt du corps électrisé et remplacée par une autre qui s'électrise, et ainsi de suite. C'est par ce moyen que l'électricité que possède un corps peut se répandre entièrement dans une atmosphère qui renferme des vapeurs aqueuses.

Le mode de déperdition le long des supports, devenus imparfaits par le contact de l'air humide, n'est pas le même, parce que les parties aqueuses contractent un

assez grand degré d'adhérence avec les surfaces, dont il faut tenir compte.

93. Nous allons d'abord déterminer la loi suivant laquelle l'électricité se perd par le contact de l'air. Les corps conducteurs chargés d'électricité étant toujours soutenus par des corps isolants, on doit avoir un résultat composé de la perte de l'électricité par le contact de l'air, et de la perte de l'électricité le long de la surface du support, à moins que l'on ne parvienne à soutenir le corps par un support isolant, dont la surface soit proportionnellement moins chargée d'humidité que les molécules de l'air environnant; ainsi, en diminuant beaucoup la surface de contact du corps électrisé et de son soutien, la diminution de l'électricité du corps serait due en entier au contact de l'air. Coulomb (1), ayant essayé pour supports plusieurs matières isolantes, a trouvé que lorsque la densité électrique du corps soutenu n'est pas très-considérable, un petit cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque, d'une demi-ligne de diamètre, et de 18 à 20 lignes de longueur, suffit pour isoler parfaitement une balle de sureau de 5 à 6 lignes de diamètre; que lorsque l'air est sec, un fil de soie très-fin passé dans de la cire d'Espagne bouillante, et ne formant qu'un petit cylindre d'un quart de ligne de diamètre, et de 5 à 6 pouces de longueur, remplit le même objet; enfin, qu'un fil de verre, tiré à la lampe d'émailleur, de 5 à 6 pouces de longueur, n'isole la balle que dans des jours très-secs, et lorsqu'elle est chargée d'un très-faible degré d'électricité. Coulomb ayant suspendu à un fil de soie très-fin, enduit de cire d'Espagne et terminé par un petit cylindre de gomme laque de 18 à 20 lignes de longueur, une petite balle de sureau semblable à celle de l'aiguille, il l'introduisit par l'ouverture du couvercle de la balance électrique. Les balles ayant été électrisées au moyen d'une épingle à grosse tête, isolée et chargée d'électricité, se repoussèrent mutuellement.

(1) Mémoires de l'Acad. des Sc., 1785, p. 615.

La balle de l'aiguille fut chassée, par exemple, à 40 degrés ; en tordant le fil de suspension de 140°, il la ramena à 20 degrés ; il observa l'instant où cette balle répondait très-précisément à 20 degrés. L'électricité se perdant peu à peu, les balles se rapprochèrent ; mais pour les maintenir toujours à la première distance de 20 degrés, il détordit le fil de suspension de 30 degrés, et la force de torsion étant diminuée d'autant, les balles furent chassées à un peu plus de 20 degrés. Il attendit ensuite l'instant où la balle de l'aiguille arrivait à 20 degrés, et tint compte du temps écoulé entre les deux opérations, qui se trouva être de 3' : il résulta de là qu'après la première observation, la distance des balles étant 20, la force répulsive avait pour mesure 140 degrés + 20 ; que 3' après, la force répulsive, à la même distance de 20 degrés, n'était plus que 110 degrés + 20, c'est-à-dire, qu'elle était diminuée de 30 degrés, ou de dix degrés par minute : mais comme la force moyenne entre les deux observations était mesurée par 145 degrés, et qu'elle diminuait de 30 degrés en 3', ou de 10 degrés par minute, la force électrique des deux balles diminuait donc de $\frac{10}{145}$ par minute. C'est d'après cette méthode que Coulomb a formé le tableau suivant (n° 1) :

EXPÉR

Pour déterminer la quantité d'électricité perdue

N° 1.

ÉPOQUES DES expériences.			DISTANCE des balles.	
		Matin.		
1re expérience,	1er essai....	6h 32′ 30″	..... 30°	....
le 8 mai.	2e *id.*.......	6 38 15	..... *id.*	....
Hygrom. 75 degrés..	3e *id.*......	6 44 30	..... *id.*	....
Thermo. 15° $\frac{1}{2}$......	4e *id.*......	6 53 0	..... *id.*	....
Barom. 28 p. 3 l....	5e *id.*......	7 3 0	..... *id.*	....
	6e *id.*......	7 17 0	..... *id.*	....
		Matin.		
2e expérience,	1er essai ...	5h 45′ 30″	..... 30°	....
le 29 mai.	2e *id.*......	5 53 0	..... *id.*	....
Hygrom. 69 degrés..	3e *id.*......	6 2 30	..... *id.*	....
Thermo. 15° $\frac{1}{2}$......	4e *id.*......	6 12 15	..... *id.*	....
Barom. 28 p. 4 l....	5e *id.*......	6 33 0	..... *id.*	....
	6e *id.*......	6 51 0	..... *id.*	....
		Matin.		
3e expérience,	1er essai....	11h 53′ 45″	..... 20°	...
le 22 juin.	2e *id.*......	11 56 45	..... *id.*	...
Hygrom. 87 degrés..	3e *id.*......	11 59 45	..... *id.*	...
Thermo. 15° $\frac{3}{4}$......	4e *id.*	12 5 0	..... *id.*	...
Barom. 27 p. 4 l....	5e *id.*.......	12 5 0	..... *id.*	...
		Matin.		
4e expérience,	1er essai....	7h 45′ 40″	..... 20°	...
le 2 juillet.	2e *id.*......	7 49 0	..... *id.*	...
Hygrom. 80 degrés..	3e *id.*......	7 57 20	..... *id.*	...
Thermo. 15° $\frac{3}{4}$......	4e *id.*......	8 9 10	..... *id.*	...
Barom. 28 p. 2 li...	5e *id.*......	8 17 30	..... *id.*	...

IENCES

pendant une minute, par le contact de l'air.

TORSION du micromètre.	TEMPS écoulé entre deux observations consécutives.	FORCE électrique perdoe entre deux observations.	FORCE moyenne entre deox observetions.	RAPPORT de le force électr. perdoe per le corps pendent une minote, à la force moyeu. du corps.
120°				
100	5′ ¾	20°	140°	$\frac{1}{40}$
80	6′ ¼	*id.*	120	$\frac{1}{38}$
60	8′ ½	*id.*	100	$\frac{1}{42}$
40	10′	*id.*	80	$\frac{1}{40}$
20	14′	*id.*	60	$\frac{1}{42}$
130°	7′ ½	20°	150°	$\frac{1}{56}$
110	9′ ½	*id.*	130	$\frac{1}{61}$
90	9′ ¾	*id.*	110	$\frac{1}{54}$
70	20′ ¾	*id.*	75	$\frac{1}{58}$
40	18′	*id.*	60	$\frac{1}{54}$
20				
80	3′	20°	90°	$\frac{1}{13}$ ½
60	3′	*id.*	70	$\frac{1}{11}$
40	5′ ¼	*id.*	50	$\frac{1}{13}$ ½
20	11′ ¼	*id.*	28	$\frac{1}{15}$ ½
5				
80°	5′ ⅓	20°	90°	$\frac{1}{24}$
60	8′ ⅓	*id.*	70	$\frac{1}{29}$
40	11′ ⅚	*id.*	50	$\frac{1}{30}$
20	8′ ⅓	*id.*	35	$\frac{1}{19}$
10				

Observations sur le tableau ci-joint.

94. On voit, d'après les résultats consignés dans la 7e colonne, que le rapport de la force électrique perdue à la force totale, a été représenté le même jour, ou dans le même état d'humidité de l'air, par une quantité constante; que ce rapport n'a varié qu'à mesure que l'hygromètre a annoncé une variation; que pour un même état de l'air, la perte de l'électricité est toujours proportionnelle à la densité électrique.

La loi de la perte de la densité électrique étant déterminée, Coulomb a trouvé par le calcul l'état électrique des deux balles après un temps donné (1).

Avec des balles de grosseur très-différente, et ne possédant pas la même densité électrique, le rapport de la force perdue dans une minute à la force totale reste toujours une quantité constante. Quelles que soient la figure et la grandeur d'un corps électrique, le décroissement de la densité électrique a toujours pour mesure une quantité qui est à peu près constante, pourvu que l'air soit sec et que le degré d'électricité ne soit pas considérable. Coulomb a trouvé encore que la nature du corps n'influe nullement sur la loi du décroissement de l'électricité; ainsi, dans une série d'expériences qu'il a faites à ce sujet, l'électricité décroissait de $\frac{1}{82}$ par minute pour des balles de sureau, des balles de cuivre, et même pour des balles de cire d'Espagne.

L'affaiblissement de l'électricité dans l'air dépend de l'état hygrométrique de l'air. Pour le déterminer, Coulomb a cherché le rapport qui existe entre l'état plus ou moins humide de l'air, et le décroissement de l'électricité dans une minute; il a trouvé que ce décroissement est proportionnel au cube du poids de l'eau contenue dans un volume d'air. Néanmoins, cet illustre

(1) Mémoires de l'Acad. des Sc., 1785, p. 619.

physicien n'a pas regardé cette loi comme suffisamment démontrée.

95. Il nous reste à trouver la quantité d'électricité qui se perd le long des supports isolants; voici la marche que Coulomb a suivie (1) : il a pris pour soutiens des corps qui étaient assez isolants pour que l'on pût faire de suite plusieurs observations, sans être forcé à chaque fois d'électriser les balles. Il a déterminé ensuite par le calcul la partie de l'électricité perdue par le contact de l'air, et celle perdue le long du soutien. La balle de moelle de sureau qu'il a introduite dans l'ouverture de la balance pour chasser celle de l'aiguille, était soutenue par un fil simple de soie, tel qu'il sort du cocon, et d'une longueur de 15 pouces. Le tableau n° 2 renferme les résultats qu'il a obtenus dans deux expériences faites les 28 et 29 mai, les mêmes jours qu'il a expérimenté pour former le tableau n° 1. En comparant donc les résultats de celui-ci avec ceux consignés dans l'autre, il sera facile d'en déduire la quantité d'électricité perdue, à chaque instant, le long des soutiens.

(1) Mémoires de l'Acad. des Sc., 1785, p. 627.

EXPÉR

Pour déterminer la perte de l'électri

N° 2.

ÉPOQUES des expériences.					DISTANCE des balles.	
		Matin.				
1re expérience, le 28 mai.	1er essai...	10h	0′	0″	..... 30°	....
	2e *id*......	10	2	30	..... *id.*	....
	3e *id*......	10	8	0	..... *id.*	....
	4e *id*......	10	13	0	..... *id.*	....
	5e *id*......	10	29	30	..... *id.*	....
	6e *id*......	10	50	30	..... *id.*	....
	7e *id*......	11	7	0	..... *id.*	....
		Matin.				
2e expérience, le 29 mai.	1er essai...	7h	34′	0″	..... 30°	....
	2e *id*......	7	36	40	..... *id.*	....
	3e *id*......	7	41	30	..... *id.*	....
	4e *id*......	7	48	20	..... *id.*	....
	5e *id*......	7	55	45	..... *id.*	....
	6e *id*......	8	27	30	..... *id.*	....
	7e *id*......	8	25	0	..... *id.*	....
	8e *id*......	8	42	30	..... *id.*	....
	9e *id*......	9	5	0	..... *id.*	....

IENCES

cité le long des supports isolants.

TORSION du micromètre.	TEMPS écoolé entre deux observations consécutives.	FORCE électrique perdue entre deux observations.	FORCE moyenne entre deux observations.	RAPPORT de la force électr. perdue pendant une minute, à celle qui reste au corps.
150°	2′ ½	30°	165°	$\frac{1}{14}$
120	5′ ½	40	130	$\frac{1}{78}$
80	5′	20	100	$\frac{1}{25}$
60	16′ ½	40	70	$\frac{1}{29}$
20	21′	20	40	$\frac{1}{42}$
0	16′ ½	10	25	$\frac{1}{41}$
10				
150	2′ 40″	20	170	$\frac{1}{23}$
130	4′ 50″	*id.*	150	$\frac{1}{29}$
110	6′ 50″	*id.*	130	$\frac{1}{44}$
90	7′ 25″	*id.*	110	$\frac{1}{43}$
70	11′ 45″	*id.*	90	$\frac{1}{33}$
50	17′ 30″	*id.*	70	$\frac{1}{81}$
30	17′ 30″	*id.*	52	$\frac{1}{58}$
15	22′ 30″	*id.*	38	$\frac{1}{56}$
1				

On remarque, dans ce tableau, que le décroissement de l'électricité, qui est d'abord beaucoup plus prompt lorsque la densité est considérable, qu'il ne devrait être, s'il était uniquement dû au contact de l'air, parvient, dans les deux expériences, lorsque la densité électrique de la balle soutenue par le fil de soie est réduite à un certain degré, à être précisément le même que lorsque la faculté isolante du soutien est parfaite. Il résulte de là que le fil de soie de 15 pouces de longueur isole parfaitement, lorsque l'action réciproque des deux balles est mesurée dans la première expérience par une torsion de 40° et au-dessous, puisque la perte n'est que de $\frac{1}{43}$ par minute, qui est la même que Coulomb avait trouvée le même jour dans le tableau n° 1, par suite du contact de l'air.

96. Il est facile alors de calculer, pour un instant donné, la réaction électrique de la boule mobile, d'après la loi du décroissement dans l'air ; mais l'observation de la force répulsive totale faisant connaître le produit des deux réactions électriques des deux boules, on en déduit pour le même instant le réaction électrique de la boule fixe. Coulomb (1) ayant cherché le degré de réaction électrique auquel chacun des supports commence à isoler parfaitement, a trouvé que l'électricité de cette réaction était proportionnelle à la racine carrée de leur longueur; ainsi, dans le même état de l'air, un support d'une longueur quadruple isole parfaitement une quantité double d'électricité.

Cette loi n'a lieu néanmoins qu'entre des supports cylindriques très-fins de même nature et de même diamètre, mais dont la longueur seule est différente quand les deux autres conditions varient; c'est la formule même qui sert à déduire le rapport. Coulomb a trouvé que pour des fils de gomme laque et de soie, de même longueur et de même diamètre, l'intensité de la réaction électrique, à laquelle l'isolement commence, est dix fois plus forte pour la première substance que pour l'autre.

(1) Mémoires de l'Acad. des Sc., 1785, p. 630.

§ III. *Distribution de l'électricité sur la surface des corps conducteurs isolés.*

97. Nous pouvons maintenant étudier la distribution de l'électricité sur la surface des corps conducteurs isolés, puisque nous pouvons ramener par le calcul la réaction électrique des corps à un état constant, malgré la déperdition continuelle qui s'opère dans l'air et par les supports isolants.

Lorsqu'on communique de l'électricité à un corps conducteur isolé, cette électricité se porte tout entière à sa surface. Ce fait a été observé d'abord par Beccaria, et ensuite par Coulomb, qui a prouvé en même temps que le fluide électrique ne se répand dans aucun corps par une affinité chimique ou par une attraction élective, mais qu'il se partage entre différents corps mis en contact uniquement en raison de son action répulsive (1).

Pour prouver que toute l'électricité se porte à la surface des corps, on prend deux calottes très-minces d'une substance conductrice, qui puissent envelopper complétement un corps de forme sphéroïdale, et l'on adapte à ces calottes des manches isolants, afin de pouvoir les manier sans enlever leur électricité. Le sphéroïde est suspendu à un fil de soie recouvert de gomme laque; après lui avoir donné une électricité quelconque, on l'enveloppe avec les deux calottes, qui se trouvent dans l'état naturel; on les retire aussitôt, et l'on trouve qu'elles sont électrisées de la même manière que le sphéroïde, tandis que celui-ci a perdu toute son électricité; ainsi donc, toute la sienne s'est transportée à la surface, sans qu'il en soit resté la moindre trace à l'intérieur.

98. Coulomb a observé de la manière suivante la même propriété dans un corps de forme quelconque : ayant pratiqué à la surface de ce corps des trous de sept ou huit millimètres de diamètre, et d'une profondeur plus ou

(1) Mémoires de l'Acad. des Sc., 1786, p. 67.

moins grande, il y introduisit un petit disque de papier doré fixé à l'extrémité d'un fil de gomme laque, de manière à atteindre le fond des trous sans toucher les bords de l'ouverture. Ce cercle, retiré avec précaution, ne lui donna à l'électroscope aucun indice d'électricité. Pour être assuré que le disque ne touche aucun des points de la surface contiguë au trou, on y adapte un petit tube de verre, qui sépare le disque de la surface.

On peut encore rendre sensible cette propriété par une expérience curieuse : on prend un cylindre isolé, mobile autour d'un axe horizontal, auquel on imprime un mouvement de rotation, au moyen d'une manivelle en verre. On enroule sur le cylindre un ruban de métal, dont l'extrémité inférieure est terminée en demi-cercle. Un électroscope à balles de sureau communique à cet appareil. Le cylindre étant électrisé, les balles divergent aussitôt; mais dès l'instant que l'on commence à dérouler le ruban, les balles se rapprochent, ce qui annonce un affaiblissement graduel dans la tension de l'électricité. En enroulant de nouveau le ruban, la divergence des balles recommence.

99. Coulomb a démontré de la manière suivante que le fluide électrique ne se répand dans aucun corps par une affinité chimique. Ayant électrisé de la même manière la balle de cuivre de sa balance et le disque de clinquant, aussitôt après la répulsion, il augmenta la torsion d'un certain nombre de degrés, et détermina la torsion totale et la distance qui en résulte entre la balle et le disque. Il fit toucher ensuite la balle par une autre de même diamètre et d'une matière différente, de moelle de sureau par exemple. Ayant retiré celle-ci, le disque de clinquant vint se placer à une moindre distance de la balle de cuivre. Il diminua la torsion jusqu'à ce que le disque fût ramené à la même distance, et il trouva que, dans ce cas, la torsion n'était plus que la moitié de ce qu'elle était primitivement. Il en résultait que la force répulsive était diminuée de moitié. Or, leur action électrique étant en raison directe des masses et en raison inverse des

distances, et comme les distances sont les mêmes, les actions sont comme les quantités de fluide. Dès lors la balle de cuivre n'a plus que la moitié de son fluide. Il y a donc eu, lors du contact de la balle de cuivre et de la balle de sureau, partage égal de l'électricité, lequel est dépendant seulement, comme on voit, de la forme des deux corps.

D'un autre côté, le fluide électrique n'étant retenu à la surface des corps que par la pression de l'air environnant, nous pouvons donc le considérer comme formant sur les corps conducteurs une couche très-mince, dont la surface extérieure est la même que celle du corps, tandis que la surface intérieure, qui est très-mince, en diffère très-peu. L'épaisseur de cette couche en un point quelconque n'est autre que sa tension électrique en ce point.

100. Pour reconnaître cette tension, on touche ce point avec un petit cercle de clinquant fixé à l'extrémité d'un fil de gomme laque. On porte ensuite le disque dans la balance de Coulomb, pour déterminer la quantité d'électricité qu'il a prise. Il faut avoir l'attention d'opérer avec assez de rapidité pour que le cercle mobile ne perde pas sensiblement de son électricité pendant toute la durée des expériences. Ce disque étant très-petit relativement à la surface du corps, la quantité d'électricité qu'il prend ne diminue pas sensiblement celle du corps, et peut être considérée comme proportionnelle à celle du point de la surface qu'il a touché. Rien n'est plus simple que de prouver cette proportionnalité.

On prend un cylindre de laiton isolé, dont la longueur est plus grande que le diamètre; on l'électrise et on porte le plan d'épreuve, d'abord au milieu, et ensuite aux extrémités. Dans chaque cas, la réaction électrique n'est pas la même. Faisons toucher le cylindre avec un autre de même nature, isolé de la même manière, et dont toutes les dimensions soient égales; le premier cédera à l'autre la moitié de son électricité. Si l'on renouvelle le contact avec le plan d'épreuve, les réactions

électriques des points semblablement placés seront moitié de ce qu'elles étaient avant. En continuant à enlever au premier corps le quart, le huitième de son électricité, les réactions suivront le même rapport.

On voit donc que, bien que les quantités absolues d'électricité prises successivement par le plan d'épreuve, en un point quelconque du corps, soient proportionnelles à la somme d'électricité répandue sur ce corps, néanmoins les quantités prises au même instant sur différents points conservent toujours les mêmes rapports.

101. Coulomb a encore fait usage d'une autre méthode pour déterminer l'épaisseur de la couche électrique d'un corps qui a été touché par un autre. Cette méthode consiste à placer le corps électrisé dans la balance électrique, après avoir donné au disque de clinquant la même espèce d'électricité que celle du corps. L'on ramène ensuite, au moyen du micromètre de torsion, l'aiguille qui a été repoussée à une distance quelconque du corps électrisé; puis l'on détermine, comme à l'ordinaire, l'action répulsive que les deux corps exercent l'un sur l'autre. L'on fait toucher ensuite le corps électrisé placé dans la balance au corps avec lequel on veut qu'il partage son électricité, et, en détordant le fil de suspension, l'on ramène l'aiguille à la distance du corps qui avait été observée à la première opération. On détermine par ce moyen la quantité d'électricité qui a été laissée au corps placé dans la balance, par celui avec lequel il a été mis en contact.

Cette méthode donne en masse le rapport des quantités d'électricité partagées entre les deux corps, tandis que l'autre accuse immédiatement la densité électrique dans chaque point d'un corps conducteur.

102. On doit à Coulomb un grand nombre d'expériences sur la manière dont le fluide électrique se partage entre deux corps conducteurs mis en contact, et sur la distribution de ce fluide dans les diverses parties de la surface de ces corps. Nous allons rapporter quelques-uns des résultats qu'il a obtenus.

Il a cherché d'abord la distribution de l'électricité entre un globe électrisé et un plan circulaire qui le touche tangentiellement par son centre. Il prit un globe de huit pouces de diamètre placé sur un isoloir; l'ayant électrisé positivement, il détermina sa densité électrique en le touchant avec un globe d'un pouce de diamètre, qu'il introduisit ensuite dans la balance. Cette densité se trouva être de 144°. Il fit toucher ensuite au globe un plan circulaire isolé, de six pouces de diamètre et d'un quart de ligne d'épaisseur. Ayant déterminé de nouveau la densité électrique qui restait au globe de huit pouces, il la trouva égale à 47. Il résulte de là que, dans le partage entre le globe et le plan, le globe a conservé 47, et le plan 97, c'est-à-dire à peu près le double. La surface du globe étant égale à une des surfaces du plan de seize pouces de diamètre, et celui-ci en ayant deux, il s'ensuit que le fluide électrique s'est distribué entre le plan et le globe, proportionnellement aux surfaces. Il a vérifié cette loi dans un grand nombre de cas.

Il faut conclure de là, que lorsqu'on touche la surface d'un globe, en un point quelconque, avec un très-petit plan, pour déterminer la tension électrique de ce point, ce petit plan, au moment de la séparation, prend une quantité d'électricité qui est double de celle du point de la surface qu'il vient de toucher.

Voici quelques-uns des résultats de Coulomb.

RAPPORT des rayons.	RAPPORT entre l'étendue des surfaces.	RAPPORT de la densité électrique entre le petit et le gros globe.
1	.... 1	 1
9	.... 4	 1,08
4	.... 16	 1,30
8	.... 64	 1,65
∞	.... ∞	 2,00

Cette table indique le rapport des densités du fluide

électrique, lorsque après la séparation des deux globes, le fluide électrique se répand uniformément sur leur surface, ce qui n'a pas lieu lorsque ces globes sont en contact.

103. Deux globes égaux, de 8 pouces chacun de diamètre, ayant été mis en contact, comme l'indique la fig. 45, le plan d'épreuve a été porté successivement sur des points situés à 30, 60, 90 et 180° du point de contact.

La moyenne de deux observations faites à 30° lui a donné pour force répulsive............. 6,50.

Au même instant, cette force à 90° était de.............................. 31,00.

Il en résulte que le rapport de la densité électrique à 90° avec celle à 30°, est de.......................... 4,77.

Le rapport moyen de la densité électrique des points à 60° et à 90° est de.... 1,25.

Le rapport moyen de la densité des points à 90° et 180° est de.......... 0,95.

On voit donc que la densité est très-petite jusqu'à 30°; qu'elle augmente rapidement jusqu'à 60°; peu de 60° à 90°, et qu'elle est presque uniforme de 90° jusqu'à 180°.

Coulomb a observé qu'en touchant l'un des globes à 20° du point de contact et au-dessous, la réaction dans la balance est nulle, de sorte que l'on peut regarder l'électricité comme nulle depuis le point de contact jusqu'à 20° de ce point.

Quand l'un des globes n'a que la moitié du diamètre de l'autre, le premier ayant huit pouces et le second quatre, il a trouvé que la densité est presque nulle dans le petit globe jusqu'à 30°.

Que le point à 90°, comparé avec celui à 60°, donne, pour le rapport moyen des densités, à peu près................................ 1,70.

Que le point à 90°, comparé avec celui à 180°, donne...................... 0,75.

De sorte que la densité augmente de 60 à 90° dans

le rapport de 10 à 17, et de 90 à 180° dans celui de 75 à 100.

Lorsque les diamètres sont comme 4 : 1, la densité du petit globe, depuis 90° jusqu'à 180°, augmente dans le rapport de 100 : 1,43.

Plus les deux globes sont inégaux, plus la densité varie sur le petit globe, depuis le point de contact jusqu'à 180° de ce point, et plus elle approche de l'uniformité sur le grand.

Coulomb a cherché également la distribution de l'électricité : 1° sur un nombre quelconque de globes égaux mis en contact, et dont les centres se trouvent sur la même ligne droite; 2° sur les différentes parties d'un cylindre électrisé; 3° sur un gros globe et une file de petits globes mis tous en contact. Enfin il a déterminé dans quel rapport le fluide électrique se partage entre un gros globe et des cylindres de différents diamètres et de différentes longueurs, mis successivement en contact avec le globe.

Six globes égaux de 2 pouces de diamètre ayant été mis en contact, Coulomb a trouvé que la quantité d'électricité que contient le premier est à celle que contient le deuxième, :: 1,48 : 1,00; que la quantité d'électricité que contient le premier globe est à celle que contient le troisième, :: 1,56 : 1,00. De sorte que la masse du fluide électrique diminue à peu près d'un tiers du premier au deuxième globe, et d'un $\frac{1}{15}$ du second au troisième.

Dans une suite de 24 globes, de 2 pouces de diamètre, en comparant le premier globe avec le deuxième, et successivement avec les autres, il a observé que la quantité d'électricité que contenait le premier globe était à celle que contenait le deuxième :: 1,56 : 1,00. En comparant le premier et celui du milieu, le rapport s'est trouvé être :: 1,75 : 1,00.

Il a conclu de ces deux expériences et d'une autre que je ne rapporte pas, que, quel que soit le nombre des globes mis en contact sur une ligne droite, la den-

sité moyenne varie considérablement du premier au deuxième globe, et ensuite très-lentement du deuxième jusqu'à celui du milieu.

Pour chercher la distribution du fluide électrique sur la surface d'un cylindre, il a pris un cylindre de 2 pouces de diamètre et de 30 pouces de longueur, terminé par deux demi-sphères et posé sur un support isolant. Il a trouvé que la densité électrique au milieu du cylindre est à celle de l'extrémité :: 1,00 : 2,30.

En comparant le point milieu du cylindre avec un point pris à 2 pouces de l'extrémité, il a trouvé que le rapport des densités était :: 1,00 : 1,25.

En comparant le point milieu avec un point sur le grand cercle de la demi-sphère, qui termine le cylindre à 1 pouce de son extrémité, le rapport des densités était :: 1,00 : 1,80.

Il résulte évidemment de là que, sur les deux derniers pouces à l'extrémité du cylindre, la densité électrique est plus considérable que vers le milieu du cylindre, et qu'elle varie peu depuis le milieu du cylindre jusqu'à 2 pouces de son extrémité.

Coulomb a cherché aussi la manière dont le fluide électrique se distribue entre un certain nombre de globes égaux mis en contact sur une même ligne, terminée par un globe d'un plus grand diamètre, mais je n'en ferai pas mention ici.

Je donnerai seulement les résultats qu'il a obtenus avec des lames de métal.

Il prit une lame mince et isolée d'acier, de onze pouces de long, d'un pouce de large, et d'une demi-ligne d'épaisseur. Afin de la toucher dans toute sa largeur, il donna au plan d'épreuve une longueur d'un pouce sur trois lignes de large; en l'appliquant d'abord au centre de la lame, puis à un pouce de l'extrémité, il obtint les résultats suivants :

POINTS TOUCHÉS.	TORSIONS observées.	TORSIONS moyennes au milieu.	TORSIONS moyennes à 1 pouce de l'extrémité.	RAPPORT des torsions moyennes.
Touché au milieu.......	... 370°			
A 1 pouce de l'extrémité.	... 440	.... 360 ...	... 440 ...	... 1,22
Au milieu.............	... 350	.... 350 ...	... 417,5 ...	... 1,20
A 1 pouce de l'extrémité.	... 395	.... 335 ...	... 395 ...	... 1,18
Au milieu............	... 320	....	moyenne.....	.. 1,20

On voit que sur des espaces égaux, pris dans toute la largeur de la lame, au centre et à 1 pouce de ses extrémités, les quantités d'électricité sont comme 1 : 1,2.

Quand les petits disques ont été placés aux extrémités, Coulomb a trouvé :

POINTS TOUCHÉS.	TORSIONS observées.	TORSIONS moyennes au milieu.	TORSIONS moyennes à l'extremité.	RAPPORTS des torsions moyennes.
Touché à l'extrémité.....	... 400			
Au milieu..............	... 195	.... 195 ...	... 395	... 2,02
A l'extrémité..........	... 390	.... 190 ...	... 390	... 2,05
Au milieu..............	... 185 . ..	.... 185 ...	... 370	... 2,00
A l'extrémité..........	... 350		moyenne.....	... 202

Le rapport entre les quantités d'électricité prises au milieu et aux extrémités de la lame est ici double; ainsi ce rapport, après avoir été presque constant depuis le milieu jusqu'à un peu plus d'un pouce des extrémités, augmente ensuite rapidement.

Coulomb, enfin, a placé le plan d'épreuve dans le prolongement, en touchant l'épaisseur de la lame par son tranchant seulement; il a eu une tension quadruple de celle du milieu.

POINTS TOUCHÉS.	TORSIONS observées.	TORSIONS moyennes au milieu.	TORSIONS moyennes au-delà du bord.	RAPPORT des torsions.
Touché au milieu.......	... 305°			
Au-delà du bord........	... 1175 ...	.... 295 ...	... 1175 . .	... 3,98
Au-milieu......	... 285...	.... 285 ...	... 1156 ...	.. 4,05
Au delà du bord.	... 1137 ...	....	moyenne....	... 4,01

Avec des lames de diverses longueurs, les rapports entre les tensions du milieu et des extrémités ont été les mêmes. Coulomb a observé que l'augmentation de l'électricité vers les extrémités se retrouve encore dans les corps prismatiques ou cylindriques très alongés, et qu'elle est d'autant plus grande qu'ils sont plus minces.

Toutes les fois qu'un cylindre s'amincit en allant vers les extrémités, l'accroissement de l'électricité devient de plus en plus rapide; enfin, si le cylindre se termine en pointe, l'accumulation est si forte que l'électricité ne peut plus être retenue par la résistance de l'air, et qu'elle s'échappe sous la forme d'aigrettes lumineuses quand la tension primitive est suffisante. Coulomb s'est occupé aussi de déterminer, par l'expérience, la distribution de l'électricité sur des plateaux circulaires. En les touchant avec le plan d'épreuve à diverses distances du centre (le plateau sur lequel il a expérimenté était en cuivre, et avait dix pouces de diamètre), il a obtenu les résultats que voici :

Distances au bord.	Quantités d'électricité.
5 po. (centre du plateau).	1
4	1,001
3	1,005
2	1,17
1	1,52
0,5	2,07
0	2,90.

Ces résultats nous montrent que l'intensité est la plus forte possible sur les bords.

§ IV. *De l'action par influence, exercée à distance par un corps électrisé sur un corps à l'état naturel.*

104. Nous n'avons considéré jusqu'ici que des corps électrisés mis en contact avec d'autres corps à l'état naturel; nous allons maintenant étudier les phénomènes produits dans ceux-ci, lorsqu'ils se trouvent placés à peu de distance des premiers.

Si l'on attache de distance en distance à un cylindre de cuivre isolé, terminé par deux hémisphères, des électromètres à pailles ou à balles de sureau, et que, le tenant par son support isolant, on l'approche d'un corps électrisé et muni également d'un électromètre à balles de sureau, on voit aussitôt celles-ci se rapprocher d'autant plus que les corps sont plus près; tandis que dans le cylindre les balles divergent de plus en plus, mais avec cette différence néanmoins, que la divergence va en diminuant jusqu'au milieu du cylindre, où se trouve un point neutre, dont la position change à mesure que l'on écarte ou que l'on éloigne les corps; qu'à partir de ce point la divergence augmente jusqu'à l'extrémité opposée. Avec le plan d'épreuve on reconnaît que les deux moitiés du cylindre sont électrisées différemment, et que la partie qui est la plus rapprochée du corps électrisé possède une électricité contraire à la sienne. Ce corps n'éprouve aucune perte dans son électricité, comme on peut s'en assurer en mesurant sa réaction électrique avant et après l'expérience.

Ces faits nous font connaître plusieurs propriétés importantes : 1° qu'un corps électrisé exerce à distance sur un autre qui ne l'est pas une action qui dissimule l'effet de son électricité, et rend l'autre corps électrique; 2° que l'action par influence décompose le fluide neutre du corps non électrisé, en sépare les deux électricités, qui se recombinent aussitôt qu'on éloigne les deux corps. Supposons que le corps électrisé possède l'électricité

positive : dès l'instant qu'il exerce une action par influence sur le cylindre, il décompose son électricité naturelle, attire l'électricité négative dans les parties les plus rapprochées de lui, tandis que l'autre électricité est repoussée dans les points les plus éloignés. Si l'on touche ceux-ci avec le doigt, on enlève alors toute l'électricité positive, et il ne reste plus au cylindre que l'électricité négative, dont l'action est dissimulée par celle de l'électricité positive de l'autre corps; mais si l'on retire ce dernier, le cylindre se trouve avoir acquis un excès d'électricité négative, et on dit alors qu'il est électrisé par influence.

Cette expérience nous prouve de nouveau que tous les corps possèdent les deux fluides électriques, qui forment par leur réunion le fluide neutre.

Les deux électricités dégagées par influence doivent réagir à leur tour sur l'électricité naturelle du corps électrisé; d'où résulte, dans chaque corps, une suite de décompositions et de recompositions qui ne cessent que lorsque les quantités d'électricité devenues libres se font équilibre, par le balancement de toutes les forces attractives et répulsives qui leur sont propres.

105. On conçoit parfaitement que le dégagement d'électricité par influence puisse s'opérer, à de grandes distances, sur des corps conducteurs isolés, placés près les uns des autres. Cet effet résulte des faits précédents. Supposons que l'on ait un certain nombre de cylindres a, a', a'', placés très-près les uns des autres; si l'on donne de l'électricité positive au cylindre a, il agira alors par influence sur le cylindre a', attirera l'électricité négative et repoussera dans la partie la plus éloignée l'électricité positive, qui agira également par influence sur a'', et ainsi de suite. Par une disposition semblable de cylindres, on peut transmettre l'électricité à de grandes distances. Ce fait nous indique déja comment le transport de l'électricité s'effectue dans les corps; en effet, les corps sont formés de molécules non juxta-posées, entre lesquelles il existe de petits vides; dès l'instant que la première molé-

cule reçoit une quantité quelconque d'électricité, elle agit par influence sur l'électricité naturelle de la molécule qui est la plus rapprochée, et ainsi de suite; l'électricité est transmise ainsi jusqu'à l'extrémité du corps.

106. Il nous reste à montrer qu'un corps électrisé reçoit le même mode d'action par l'influence d'un corps électrisé que s'il était à l'état naturel. Prenons une petite sphère munie de deux pendules mobiles à balles de sureau et électrisée positivement; présentons-lui à une certaine distance un corps électrisé aussi positivement. La divergence des balles augmentera aussitôt; l'électricité positive y est donc refoulée par l'électricité de même nature qui agit sur elle par influence; mais les électricités naturelles sont également séparées : la positive est refoulée dans les balles où elle s'ajoute à celle qui s'y trouve déja, tandis que la négative se porte vers la petite sphère, où elle neutralise une égale portion d'électricité positive. La charge primitive de la petite sphère et celle du corps peuvent être telles que la première se trouve électrisée positivement à l'état naturel ou électrisée négativement.

Quand la petite sphère possède de l'électricité négative et qu'on en approche graduellement le corps chargé d'électricité positive, les balles se rapprochent peu à peu, reviennent au contact et divergent de nouveau. Ces différents effets prouvent qu'il s'est opéré en définitive une décomposition de fluide naturel qui a refoulé du fluide négatif dans les balles.

107. Dans les corps mauvais conducteurs, la séparation des deux fluides s'opère lentement sous l'influence d'un corps électrisé, ainsi que leur recomposition. On s'assure facilement de ces deux faits en plaçant, à peu de distance de ce corps, un bâton de gomme laque, le retirant quelques instants après et le présentant à un électroscope.

L'expérience nous a prouvé que lorsqu'un corps conducteur isolé est en présence d'un corps électrisé positivement, si on le met en communication avec le sol, la partie du premier, qui est opposée aux points les

plus rapprochés du second, donne écoulement à l'électricité positive qui est chassée dans cette partie; mais cette électricité réagit de la même manière sur l'électricité naturelle de la terre, jusqu'à des distances assez considérables, en attirant à elle l'électricité négative et repoussant toujours l'autre devant elle.

108. Les faits précédents nous indiquent bien la séparation des deux électricités sur un corps qui est soumis à l'action par influence d'un autre corps électrisé, mais nous ignorons encore leur mode de répartition sur la surface, c'est-à-dire la tension électrique en un point quelconque de cette surface. Cette question peut être résolue au moyen du plan d'épreuve dont nous avons déja fait usage.

Coulomb a traité aussi cette partie de la science avec une rare sagacité. Il a commencé par examiner ce qui se passe (fig. 46) dans deux globes isolés et non électrisés, a et a', de deux pouces de diamètre chacun, que l'on place à une distance quelconque d'un globe électrisé de 8 pouces de diamètre.

Le globe c ayant été électrisé positivement, le petit globe a, présenté dans la balance à une même distance de l'aiguille, a attiré celle-ci après avoir été placé en a, avec la même force qu'il l'a repoussée lorsqu'il a été placé en a'. Ce résultat est facile à expliquer d'après ce que nous avons vu précédemment; seulement il nous démontre, d'une manière nette, que dans le dégagement de l'électricité par influence, les deux électricités contraires qui sont séparées, sont égales en quantités.

Il a comparé ensuite la densité électrique moyenne du globe a avec celle de la surface du globe c.

Le globe a étant placé à 2 pouces du globe c, il a porté dans la balance le globe a', afin de déterminer son action répulsive; il l'a trouvée de 21 degrés pour une distance donnée. Il fit toucher ensuite c par a', et introduisit de nouveau celui-ci dans la balance.

L'aiguille fut chassée à 66°; or, il avait trouvé que lorsqu'un globe de 1 pouce de rayon touche un globe

de 4 pouces de rayon, la densité moyenne sur la surface du premier était à celle du second :: 1,30 : 100; il s'ensuit que la densité du petit globe étant représentée par 66°, celle du gros globe le sera par 51. En ayant égard à l'électricité perdue pendant la durée de l'électricité, il a trouvé en définitive :

Densité élec. moy. de c : densité élec. moy. de a' :: 57 : 21 :: 2,70 : 1.

109. Il a déterminé ensuite l'état électrique des différentes parties de la surface d'un cylindre non isolé d'une très-grande longueur, placé, par une de ses extrémités, à peu de distance d'un gros globe électrisé et isolé. Le centre de ce globe étant placé dans la direction de l'axe du cylindre, si l'on fait varier la distance de ce point à l'extrémité du cylindre, on trouve que la densité électrique à cette extrémité est dans un rapport un peu au-dessous de la puissance $\frac{3}{2}$ de la raison inverse de cette distance.

Quand on présente successivement à la même distance du centre du gros globe deux cylindres non isolés de différents diamètres, on trouve que les densités électriques aux deux extrémités sont à peu près en raison inverse des diamètres des deux cylindres, pourvu néanmoins que les diamètres des cylindres soient plus petits que celui du globe.

Coulomb a déterminé le rapport des densités électriques des différents points de la surface d'un même cylindre, d'une grande longueur et non isolé, suivant que ces points sont plus ou moins éloignés du centre du globe électrisé. Il a trouvé que la densité électrique de ces points est en raison inverse du carré de leur distance au centre.

Cette loi n'a lieu qu'à une distance égale à 4 ou 5 diamètres du cylindre, à partir de l'extrémité qui regarde le globe. Jusqu'à cette limite, la densité croît en s'approchant de l'extrémité du cylindre dans un rapport plus grand que la raison inverse du carré de la distance.

110. Lorsqu'un cylindre non isolé est placé à la même

distance du centre de deux globes de différents diamètres, ayant la même densité électrique, la densité des points du cylindre, placés à la même distance du centre, est comme le carré des rayons de ces globes.

111. Soit maintenant un plan non isolé de 16 pouces de diamètre (fig. 47), placé à une distance de 4 pouces d'un globe électrisé, pour que l'électricité ne se communique pas de l'un à l'autre; supposons que ce plan soit percé en B, vers son centre, d'une ouverture de 2 pouces de diamètre, dans laquelle on introduit un petit plan circulaire de même diamètre, que l'on porte ensuite dans la balance; si l'on pose le doigt en *t*, que l'on porte le petit cercle dans la balance, dont le disque est électrisé de la même manière que le globe, pour déterminer sa réaction électrique; qu'on lui fasse toucher ensuite le globe *c*, et qu'on le porte de nouveau dans la balance, on trouve que l'action répulsive, dans ce dernier cas, est quatre fois plus grande que l'action attractive du même petit plan, qui avait été placé au centre. En faisant varier la distance c B, et comparant entre elles les densités électriques du point B relativement à cette distance, Coulomb a trouvé que ces densités étaient en raison inverse du carré des distances de B en c.

Je ne m'étendrai pas davantage sur les expériences que Coulomb a faites pour déterminer la distribution de l'électricité sur la surface des corps conducteurs soumis à l'action par influence de corps électrisés, parce que les résultats que j'ai rapportés suffiront pour donner une idée de cette distribution, et montrer en même temps les services qu'ils ont rendus à la science en préparant les voies aux recherches analytiques qui ont porté l'électricité statique au rang des sciences exactes.

§ V. *Application de l'analyse mathématique à la distribution de l'électricité sur la surface des corps.*

112. A l'époque où parurent les travaux de Coulomb sur la distribution de l'électricité à la surface des corps,

on ne leur accorda pas toute l'importance qu'ils méritaient, parce que l'on n'aperçut pas d'abord les rapports qui liaient entre eux tous les résultats auxquels il était parvenu ; mais dès l'instant que M. Poisson eut donné la théorie mathématique de l'électricité statique, et qu'il eut montré avec quelle précision les résultats de l'expérience s'accordaient avec ceux qu'il avait déduits de l'analyse, on sentit alors l'immense service que Coulomb avait rendu à la physique.

Dans l'impossibilité où je suis de faire connaître en entier les travaux de M. Poisson, je me bornerai à rapporter les principaux résultats de sa savante analyse (1). Voici l'hypothèse qui a servi de base à ses calculs :

Tous les phénomènes électriques sont dus à deux fluides différents, répandus dans tous les corps de la nature; les molécules d'un même fluide se repoussent mutuellement, tandis qu'elles attirent celles de l'autre en raison inverse du carré de la distance : à la même distance, le pouvoir attractif est égal au pouvoir répulsif; d'où résulte cette conséquence, que les corps qui renferment une égale quantité de l'un et l'autre fluide ne peuvent exercer aucune action sur les fluides contenus dans les corps environnants.

M. Poisson s'est occupé des phénomènes que présentent les corps conducteurs électrisés, soit quand on les considère isolément, soit lorsqu'on les soumet à leur influence mutuelle.

Après avoir rappelé que dans un corps électrisé l'électricité se porte entièrement à sa surface, il ajoute : Tout le fluide y forme une couche extrêmement mince, qui ne pénètre pas sensiblement au-dessous de cette surface, et dont l'épaisseur en chaque point dépend de la forme du corps. Cette couche est terminée extérieurement par la surface même du corps, et à l'extérieur par une autre surface très-peu différente de la première, et qui doit prendre

(1) Mémoires de l'Institut, 1811, 1re et 2e parties.

la figure propre à l'équilibre des forces répulsives de toutes les molécules qui la composent. Pour établir cette condition d'équilibre, il ne suffit pas que la couche fluide qui recouvre le corps se tienne en équilibre à la surface de ce corps, il faut encore qu'elle n'exerce ni attraction, ni répulsion, sur un point quelconque, pris au hasard dans l'intérieur du corps; ce qui exige que la résultante de ces actions soit égale à zéro; car si elle ne l'était pas, elle agirait sur le fluide naturel du corps, en décomposerait une nouvelle quantité, et dès lors leur état électrique en serait changé. Il suit de là que, pour avoir la loi suivant laquelle l'électricité se distribue à la surface d'un sphéroïde de forme donnée, il faut déterminer l'épaisseur de la couche fluide en chaque point de la surface, de manière que l'action de la couche entière soit nulle dans l'intérieur du corps électrisé.

113. Dans un ellipsoïde quelconque, la surface intérieure de la couche électrique est celle d'un autre ellipsoïde concentrique semblable au premier, ce qui détermine son épaisseur en un point quelconque; cette épaisseur est la plus grande au sommet du plus grand des trois axes, et la plus petite au sommet du plus petit. Les épaisseurs de la couche, ou les quantités d'électricité qui répondent à deux sommets differents, sont entre elles comme la longueur des axes qui aboutissent à ces sommets. Ces résultats sont la conséquence de ce qu'un sphéroïde creux, terminé par deux surfaces elliptiques semblables entre elles, n'exerce aucune action sur tous les points compris entre son centre et sa surface intérieure, en y comprenant aussi les points de cette surface.

D'un autre côté, M. Laplace (1) avait donné la condition qui doit avoir lieu pour que l'attraction d'une couche terminée par deux surfaces à peu près sphériques, soit égale à zéro, relativement à tous les points in-

(1) Mécanique céleste, t. xi, p. 37.

térieurs. Si donc l'on suppose que l'épaisseur de cette couche soit très-petite, on aura la distribution de l'électricité à la surface d'un sphéroïde peu différent d'une sphère. Ce cas et le précédent étaient les seuls, avant les recherches de M. Poisson, dans lesquels on pouvait déterminer immédiatement l'épaisseur de la couche électrique en un point quelconque de la surface d'un corps électrisé.

114. Au moyen des formules de l'attraction d'un sphéroïde, M. Poisson a trouvé qu'à la surface d'un corps, qui diffère peu d'une sphère, la force répulsive du fluide électrique est proportionnelle à son épaisseur en chaque point. Il en est encore de même à la surface d'un ellipsoïde de révolution. M. Laplace a démontré ensuite synthétiquement que ce résultat est général, et s'étend aux corps d'une forme quelconque.

La pression que le fluide électrique répandu sur la surface d'un corps exerce contre l'air, est en raison composée de la force répulsive et de l'épaisseur de la couche; et comme l'un de ces éléments est proportionnel à l'autre, il en résulte que la pression est proportionnelle au carré de l'épaisseur.

M. Poisson considère l'air comme un vase dont la forme est déterminée par celle du corps électrisé. Le fluide que ce vase renferme exerce contre ses parois des pressions différentes en différents points, de telle sorte que la pression, qui a lieu en certains points, est quelquefois très-grande, et comme infinie par rapport à celle que d'autres éprouvent. Dans les parties où la pression du fluide surpasse la résistance que l'air lui oppose, l'air cède, et le fluide s'écoule comme par une ouverture; c'est ce qui arrive à l'extrémité des pointes et sur les arêtes vives des corps anguleux; car on peut démontrer qu'au sommet d'un cône, la pression du fluide électrique deviendrait infinie si l'électricité pouvait s'y accumuler.

115. Le principe dont s'est servi M. Poisson pour déterminer la distribution du fluide électrique à la surface

d'un corps isolé, s'applique également au cas d'un nombre quelconque de corps conducteurs soumis à leur influence mutuelle. Ces corps restent dans un état électrique permanent, toutes les fois que la résultante des actions des couches fluides qui les recouvrent sur un point quelconque, pris dans l'intérieur de ces corps, est égale à zéro. En partant de ce principe, on obtient dans chaque cas autant d'équations que l'on considère de corps conducteurs, et ces équations servent à déterminer l'épaisseur variable de la couche électrique sur ces différents corps.

M. Poisson a d'abord donné les équations dans le cas de deux sphères de différents rayons, formées d'une matière parfaitement conductrice, et placées à une distance quelconque l'une le l'autre. Il a donné deux équations, au moyen desquelles on peut aisément calculer l'épaisseur de la couche en différents points de la surface de l'une et l'autre sphère : en prenant le diamètre dans le rapport de 1 : 2, il a obtenu sur la plus petite :

POSITIONS des points comparés, par rapport au point de contact.		RAPPORT de la seconde épaisseur à la première.	
		Par l'expérience.	Par la théorie.
90° et	30°	insensible	insensible
90	60	0,5882	0,5563
90	90	1,0000	1,0000
90	180	1,3333	1,3535

L'accord entre les résultats de l'expérience et ceux du calcul est aussi parfait qu'on peut le désirer.

116. Quand les deux sphères se touchent, les équations, qui sont aux différences finies, s'intègrent sous une forme très-simple. M. Poisson a donné en même temps les formules au moyen desquelles on peut calculer l'épaisseur de la couche électrique en un point quelconque de cha-

cune des deux sphères : cette épaisseur est nulle au point de contact. Coulomb avait obtenu ce résultat remarquable par l'expérience, comme nous l'avons vu précédemment. Dans le voisinage du point de contact et jusqu'à une assez grande distance de ce point, l'électricité est très-faible sur les deux sphères. Quand elle commence à devenir sensible, elle est d'abord plus forte sur la plus grande des deux surfaces, et elle croît ensuite plus rapidement sur la plus petite, et au point diamétralement opposé à celui du contact sur cette sphère, l'épaisseur de la couche électrique est toujours plus grande qu'elle ne l'est au même point sur l'autre sphère.

Coulomb avait trouvé tous ces résultats par l'expérience; mais, pour montrer avec quelle exactitude ils s'accordent avec ceux qui sont déduits du calcul, je vais mettre en regard les uns et les autres, dans le cas où les rayons des sphères sont :: 1 : 2.

INDICATION des résultats comparés.	RAPPORTS des densités obtenues		DIFFÉRENCE entre le calcul et l'observation.
	Par le calcul.	Par l'expérience.	
A 90° et 60° du point de contact.... .	.... 1,797 : 1	..... 1,70 : 1	 0,06
A 90° et 180°.... .	.... 0,739 : 1	..... 0,75 : 1	.... — 0,01
Sur le petit et grand globe...........	.... 1,238 : 1	..... 1,25 : 1	.... — 0,01

Les différences entre les résultats du calcul et ceux qui sont déduits de l'expérience, sont si faibles, qu'elles peuvent être attribuées aux erreurs que l'on commet toujours dans des expériences aussi délicates que celles dont nous rendons compte ici.

117. En séparant les deux sphères, chacune d'elles emporte la quantité totale d'électricité dont elle était recouverte, laquelle se distribue uniformément sur chacune d'elles. La formule qu'il a donnée lui a permis de résou-

dre cette question : Trouver suivant quel rapport l'électricité se partage entre deux globes qui se touchent, et dont les rayons sont donnés. Ce rapport est toujours moindre que celui des surfaces. Le quotient de la plus grande épaisseur, divisé par la plus petite, augmente à mesure que le plus petit rayon diminue; mais ce quotient tend vers une limite constante, dont la valeur est à peu près $\frac{5}{3}$.

Coulomb a constamment trouvé par l'expérience que ce rapport est toujours au-dessous du nombre deux. En général, il existe un accord remarquable entre le calcul et les expériences de Coulomb, comme on en jugera encore par les résultats suivants :

RAPPORT des rayons des sphères.	RAPPORT des épaisseurs de la courbe electrique sur les deux sphères. Suivant le calcul.	Suiv. l'observation.	DIFFÉRENCE entre le calcul et l'observation.
1 : 2	... 1,1601 : 1 ...	.... 1,08 : 1 ...	.. + 0,07
1 : 4	... 1,3168 : 1 ...	.... 1,30 : 1 ...	.. + 0,01
1 : 8	... 1,444 : 1 ...	.... 1,65 : 1 ...	.. — 0,15

Ces différences tombent encore dans la limite des erreurs que l'on peut commettre dans des observations de ce genre. L'expérience et le calcul prouvent donc que l'épaisseur de la couche électrique est toujours la plus grande sur la plus petite des deux sphères.

118. M. Poisson a considéré aussi le cas où les deux fluides se trouvent à la fois sur une même surface; il a choisi pour cela le cas où deux sphères ne se touchent pas et sont séparées par un intervalle très-grand par rapport à l'un des deux rayons. Si l'on suppose que la petite sphère ne soit électrisée que par l'influence de la grande, on trouve que l'électricité contraire à celle de la grande se porte vers le point qui en est le moins éloigné, et

l'électricité semblable vers le point opposé; les électricités contraires en ces deux points sont à peu près égales, ou diffèrent très-peu l'une de l'autre. Lorsque la distance entre les deux sphères est très-grande, quelles que soient les électricités qu'on leur ait données, le calcul donne la distribution de l'électricité sur tous les points de la surface. Parmi les expériences de Coulomb, on trouve un fait qui confirme de nouveau la théorie à ce sujet : si l'on a deux sphères de rayons inégaux, électrisés positivement, qu'ils soient d'abord en contact, et que l'on détache la petite de la grande en les éloignant l'une de l'autre, on trouve que l'électricité, qui était nulle au point de contact, devient positive sur la grande sphère, et négative sur la petite; que l'électricité négative du point de la petite sphère le plus voisin de la grande subsiste jusqu'à une certaine distance, à laquelle elle est zéro, comme au point de contact, et au-delà de laquelle elle devient positive. Cette distance est d'autant plus grande, que les rayons des deux sphères diffèrent davantage l'un de l'autre. Mais Coulomb a remarqué que lorsqu'un des rayons est le sixième, ou moindre que le sixième de l'autre, la distance du second zéro atteint son maximum et ne varie plus sensiblement. Il a trouvé qu'à cette limite, l'intervalle qui sépare les deux sphères est un peu moindre que la moitié du rayon de la grande. Les formules relatives à deux sphères dont la distance mutuelle est très-grande par rapport à l'un des deux rayons, s'appliquent à ce cas. Si l'on suppose que le rayon est très-petit par rapport à l'autre, on trouve qu'il y a effectivement une distance pour laquelle l'électricité est nulle au point de la petite sphère le plus voisin de la grande; en deçà, l'électricité de ce point est négative, et au-delà, elle est positive, comme l'expérience l'indique. De plus, le calcul donne pour cette distance une quantité un peu plus grande que le $\frac{1}{3}$ du rayon de la grande sphère; la distance observée et la distance calculée sont toutes deux comprises entre le tiers et la moitié de ce

rayon. Ces deux résultats s'accordent aussi bien qu'on peut le désirer, car la différence doit être attribuée aux erreurs inévitables que l'on commet dans des observations aussi délicates que celles dont on vient de rendre compte, et à la perte de l'électricité dans l'air.

Quelle que soit la nature de l'électricité, puisque l'hypothèse d'où M. Poisson est parti sur la constitution des deux fluides suffit pour reproduire avec une grande exactitude tous les phénomènes d'équilibre électrique qui ont pu être soumis au calcul, nous devons l'adopter sans hésiter, sauf à la modifier si de nouvelles découvertes ne pouvaient s'y rapporter.

§ VI. *Du pouvoir des pointes.*

119. Les recherches expérimentales de Coulomb et les travaux analytiques de M. Poisson, touchant la distribution du fluide électrique sur la surface des corps, que ces corps soient en contact ou non, nous permettent d'expliquer la propriété dont jouissent les pointes de soutirer l'électricité à de grandes distances, ou de la laisser s'échapper des corps auxquels elles communiquent, sous la forme d'aigrettes lumineuses. Cette propriété a été observée pour la première fois par Franklin.

Ces effets s'expliquent parfaitement par le calcul, puisqu'on peut démontrer qu'au sommet d'un cône la tension du fluide électrique deviendrait infinie si l'électricité pouvait s'y accumuler; dès lors l'air ne pouvant y opposer une résistance convenable, elle doit s'échapper. L'expérience vient aussi confirmer ce résultat analytique.

120. Coulomb ayant mis successivement en contact une sphère de 8 pouces de diamètre, avec une file composée de deux, de quatre et de vingt-quatre globes de 2 pouces, a trouvé que les densités électriques du premier et du dernier globe de 2 pouces étaient :

1er cas (celui de deux globes) :: 1:2,54.
2e cas (celui de quatre globes) :: 10:34.

En opérant sur les 24 globes, il a déterminé la relation qui subsiste entre les états électriques de chacun d'eux.

La densité électrique du 24ᵉ globe

est à celle du...........	23ᵉ	:: 1,49 : 1,00.
du...........	12ᵉ	:: 1,70 : 1,00.
du...........	2ᵉ	:: 2,10 : 1,00.
du...........	1ᵉʳ	:: 3,72 : 1,00.
du gros globe...	0	:: 2,16 : 1,00.

On voit par là que la tension du fluide diminue à partir du 24ᵉ globe, et d'autant plus lentement, que l'on approche davantage de l'extrémité occupée par le gros globe.

Les différences deviennent encore plus sensibles, si, au lieu de 24 globes égaux, on emploie une série de globes dont les diamètres vont toujours en diminuant; cela résulte de la théorie et de l'expérience. Appliquons maintenant ces principes aux pointes. Un conducteur électrisé qui se termine en pointe peut être considéré comme un gros globe mis en contact avec une série de globes de plus en plus petits : le dernier aura donc une tension électrique considérable relativement à celle du gros globe, et si la pointe est suffisamment petite, on conçoit que cette tension devienne supérieure à la pression que l'air exerce : dès lors l'électricité se répand dans l'atmosphère. On conçoit maintenant parfaitement pourquoi des corps conducteurs électrisés, armés de pointes, ou qui présentent des angles saillants, perdent rapidement l'électricité qu'on leur donne.

On explique de la même manière pourquoi une pointe que l'on présente à un corps électrisé lui soutire toute son électricité : il se produit sur la pointe un dégagement d'électricité par influence; l'électricité de la partie extrême de cette pointe, et qui est de nature contraire à celle du corps, acquiert une intensité qui augmente à mesure que cette pointe est plus aiguë et que sa com-

munication avec le sol est plus facile. Dès l'instant que la résistance de l'air est vaincue, il y a neutralisation des deux électricités, et l'effet est le même que si la pointe avait soutiré tout le fluide électrique au corps électrisé. On peut par ce moyen transmettre au réservoir commun une grande quantité d'électricité, sans signes extérieurs très-apparents.

§ VII. *Des mouvements excités dans tous les corps par les attractions et répulsions électriques.*

121. Lorsque deux corps sont électrisés, ils se repoussent ou s'attirent, selon qu'ils possèdent la même électricité ou des électricités contraires; or, comme les actions ont lieu entre les parties constituantes des deux fluides, puisqu'il est bien démontré que le fluide électrique n'exerce aucune affinité sur la matière des corps qui servent à le coercer, nous devons rechercher comment il se fait qu'elles transmettent leur mouvement à leurs molécules. Ces corps peuvent être conducteurs ou non conducteurs; électrisés de la même manière, différemment, ou bien l'un être à l'état naturel, et l'autre posséder l'une des deux électricités. Nous allons discuter successivement ces différents cas.

Supposons d'abord deux corps non conducteurs, électrisés d'une manière quelconque. Leur électricité étant retenue par les molécules matérielles, en vertu d'une force qui nous est inconnue, chaque électricité doit transmettre au corps la même action que celle qui lui est imprimée par l'électricité de l'autre; de sorte que les deux corps se repoussent ou s'attirent, selon qu'ils possèdent la même électricité ou des électricités contraires.

Prenons maintenant un corps non conducteur et un corps conducteur, par exemple un tube de verre électrisé positivement, et un petit globe de matière conductrice librement suspendue à un fil de soie et électrisée aussi positivement; l'expérience prouve qu'il y a répulsion. Or, nous savons que lorsque le petit globe est hors

de l'influence du tube, toute son électricité forme autour de sa surface une couche excessivement mince, dont l'épaisseur est partout la même; la pression de l'air étant en outre égale sur tous les points, il n'y a pas de motif pour qu'il éprouve un déplacement : mais il n'en est plus de même lorsqu'il est soumis à l'action du tube électrisé. Dans ce cas, la couche change de forme, en raison de la répulsion qui a lieu entre les particules de fluide semblable. La tension est alors la plus forte possible dans la partie opposée aux points les plus rapprochés du tube; dès lors la pression qu'elle exerce sur l'air, laquelle est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche, est plus forte dans les points extrêmes que dans les autres; le globe sera donc chassé dans le sens de cette plus forte pression, et devra fuir le tube. Ce mouvement est dû uniquement à la différence de pression exercée par l'air sur les points du petit globe les plus rapprochés et les plus éloignés du tube.

Lorsque la petite sphère est électrisée négativement, elle se porte au contraire sur le tube : l'électricité positive du tube décompose son électricité naturelle; elle repousse dans les points opposés l'électricité positive et attire la négative; mais comme l'électricité négative qu'on lui a donnée est également attirée, il en résulte que la pression exercée sur l'air, par les points de la sphère les plus voisins du tube, sera plus forte que celle qui est relative aux points extrêmes : l'équilibre sera alors rompu, le globe sera chassé vers le tube, et l'effet sera le même que s'il était attiré par lui.

Si la sphère est dans l'état naturel, elle sera aussi attirée, en vertu des lois que nous venons de rappeler.

Les attractions et répulsions électriques s'expliquent de la même manière quand les corps sont conducteurs de l'électricité, et chargés de la même espèce d'électricité ou d'électricités contraires. Seulement il faut avoir égard à la réaction des électricités dégagées sur chaque corps par l'influence de l'électricité libre de l'autre corps.

122. On observe quelquefois un effet qui paraît para-

doxal, quand on met en présence deux corps chargés de la même électricité, dont l'un est fort petit et faiblement électrisé par rapport à l'autre. En les approchant l'un de l'autre, on voit la répulsion diminuer peu à peu, devenir nulle, et se changer enfin en attraction. Il est facile d'expliquer ce phénomène : à mesure que le corps le plus gros approche de l'autre, il repousse son électricité libre en même temps qu'il décompose son électricité naturelle, en attirant à lui celle de nom contraire, et repoussant l'autre qui va rejoindre la première. La répulsion due à celle-ci croît à la vérité par la diminution de la distance; mais il arrive un point où son action est moindre que celle des forces attractives des deux électricités contraires qui se trouvent plus rapprochées : il y a alors attraction.

Nous avons opéré constamment avec une petite sphère librement suspendue, pour mieux montrer comment les phénomènes d'attraction et de répulsion se déduisent des lois générales relatives à la distribution du fluide électrique sur une sphère, électrisée ou non, quand elle se trouve en présence d'un autre corps électrisé. Mais l'explication n'éprouve aucune modification quand la sphère est remplacée par un corps d'une forme quelconque, sur lequel le fluide électrique prend une position d'équilibre telle qu'il ne puisse s'échapper par aucun point; car dans ce cas, on conçoit qu'il y a toujours refoulement d'une des deux électricités dans la partie opposée au tube électrisé : dès lors, la pression exercée sur l'air par l'électricité n'étant plus la même sur tous les points du corps librement suspendu, il en résulte des effets absolument semblables à ceux que nous avons décrits.

L'expérience du tourniquet électrique montre aussi que le mouvement des corps, dans les phénomènes électriques, est réellement dû à la différence de pression que l'air exerce sur tous les points de ces corps. L'appareil consiste en un pivot, sur l'extrémité supérieure duquel on pose en équilibre, au moyen d'une chape, une ai-

guille de métal, dont les deux bords sont recourbés en sens inverse dans le plan où se meut l'aiguille. On le pose sur le conducteur d'une machine électrique; aussitôt que l'on fait agir celle-ci, la tige prend un mouvement de rotation, dont la vitesse est en rapport avec la quantité d'électricité produite. Or l'électricité s'écoulant par les pointes, la pression exercée par l'air aux extrémités étant très-diminuée, l'aiguille tourne dans une direction contraire.



CHAPITRE V.

DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

§ Ier. *Des machines électriques ordinaires.*

123. Nous avons fait connaître, dans le chapitre III, les procédés à l'aide desquels on excite la puissance électrique dans les corps; il nous reste à exposer les appareils qui servent à donner à cette puissance le plus haut degré possible d'énergie. Ces appareils sont appelés *machines électriques;* ils se composent de trois parties distinctes : d'un plateau en verre, de frottoirs et de conducteurs isolés. La forme et la disposition de ces parties varient à l'infini et constituent autant de machines. Les conducteurs servent à recueillir et à conserver l'électricité que les deux autres dégagent par leur frottement mutuel.

Un tube de verre bien sec, ou mieux encore un bâton de gomme laque de quelques décimètres de longueur, frotté avec un morceau d'étoffe et présenté à une sphère isolée de métal, constitue la plus simple des machines. Si l'on veut recueillir en même temps les deux électricités, il faut isoler le frottoir et le corps frotté.

Otto de Guerike a eu le premier l'idée d'accumuler sur un corps, par le frottement, une grande quantité d'électricité. Son appareil consistait en un globe de soufre, monté sur un axe horizontal, auquel il imprimait avec une main un mouvement de rotation, tandis que l'autre était appliquée sur la surface du globe. Le frottement qui en résultait produisait un dégagement d'électricité

assez considérable pour qu'il fût accompagné d'une traînée lumineuse.

Au globe de soufre on a substitué un manchon de verre, et à ce dernier une glace circulaire, traversée par un axe horizontal, que l'on fait tourner au moyen d'une manivelle. La main a été remplacée par deux coussins de peau, entre lesquels tourne la glace, et l'électricité dégagée sur le verre a été recueillie par des conducteurs métalliques convenablement isolés.

Les coussins doivent s'appliquer le plus exactement possible sur le plateau et le presser légèrement ; on remplit ces deux conditions en les rembourrant avec du crin et les appliquant sur des ressorts, qui font effort pour les maintenir avec pression sur la glace. Cette disposition ne suffit pas pour avoir un dégagement d'électricité considérable, il est nécessaire encore d'enduire la surface des frottoirs d'une composition métallique qui provoque la puissance électrique.

Pendant le frottement, le verre prend l'électricité positive et les coussins l'électricité négative : celle-ci, si elle n'était pas enlevée à chaque instant, se répandrait sur le verre, où elle neutraliserait en partie l'électricité qu'il possède : on évite cet inconvénient en mettant les coussins en communication avec la terre.

Une condition essentielle à remplir dans la construction des machines électriques, est que les portions du verre, qui ont éprouvé l'effet du frottement, arrivent devant les conducteurs sans avoir perdu, par leur contact avec l'air, une quantité sensible de leur électricité. On y parvient en attachant aux coussins des morceaux de taffetas gommé qui, enveloppant une partie du plateau, empêchent qu'il ne perde son électricité jusqu'à son arrivée au premier conducteur. On est dans l'usage d'adapter à la machine autant de conducteurs qu'il y a de frottoirs, pour éviter que le verre n'entre sous un frottoir avant d'être déchargé.

On doit apporter le plus grand soin à l'isolement des conducteurs. On leur donne ordinairement pour sup-

ports des tubes pleins en verre, longs et minces, et dont la surface est recouverte de plusieurs couches de vernis à la gomme appliquées à chaud, lesquelles isolent mieux que le verre et se chargent moins d'humidité.

124. Tels sont les principes généraux qui servent de base à la construction des machines électriques. Nous allons maintenant faire connaître celles dont l'emploi est le plus ordinaire, soit dans les cours de physique, soit dans les recherches expérimentales. La première machine est représentée (figure 48). Le plateau de verre, dont le diamètre varie depuis 1 jusqu'à 5 pieds, tourne entre quatre coussins fixés à deux montants verticaux. On applique sur la surface postérieure de ces coussins des plaques métalliques destinées à recueillir l'électricité négative, et à la transmettre au sol par l'intermédiaire d'une chaîne métallique. Les conducteurs cylindriques en laiton, soutenus par des pieds en verre et recouverts de vernis à la gomme laque, sont armés de pointes à leurs extrémités les plus rapprochées de la glace, pour soutirer son électricité. Quand on veut disposer d'une grande quantité d'électricité, ces conducteurs ne suffisent pas, il faut les mettre en communication avec un système de conducteurs longs et cylindriques, suspendus parallèlement les uns à côté des autres. Cette disposition est très-favorable, quand on veut obtenir de fortes charges avec de faibles tensions, attendu que toute l'électricité se déchargeant d'un seul coup, plus les surfaces sont étendues, plus la quantité d'électricité mise en jeu est considérable. Ces conducteurs secondaires sont suspendus au plafond avec des cordons de soie.

Volta employait un système de douze cylindres, de 6 lignes de diamètre et de 8 pieds de longueur, entre lesquels il établissait une communication. Ce système produisait de grandes étincelles.

La seconde machine (fig. 49) est destinée à donner alternativement les deux électricités, et, sous ce rapport, elle doit être préférée à l'autre, qui ne donne d'ordinaire que l'électricité positive; elle en diffère en

ce que les deux paires de coussins élastiques rembourrés en crin sont placés aux extrémités d'un diamètre horizontal, et que deux conducteurs mobiles A A′ et BB′ sont disposés de manière à recevoir l'électricité que l'on veut obtenir. La construction de cette machine est due à Van-Marum de Harlem.

Si l'on désire recueillir l'électricité positive, on tourne le conducteur A A′ de manière que les cylindres qui le terminent viennent se placer près de l'extrémité des garnitures en taffetas, tandis que l'autre conducteur mobile est dans une position horizontale et touche par ses extrémités aux coussins. Dès l'instant que la machine est mise en mouvement, le plateau porte son électricité positive au conducteur vertical; l'électricité négative est transmise au conducteur horizontal, d'où elle s'échappe dans le globe au moyen d'une petite chaîne CC′.

Veut-on de l'électricité négative, on renverse les conducteurs, c'est-à-dire, que celui qui était horizontal devient vertical, et réciproquement. Il résulte de cet arrangement, que le conducteur BB′ se décharge continuellement par l'intermédiaire de la chaîne de l'électricité positive que lui communique le plateau, tandis que l'autre conducteur prend aux coussins l'électricité négative qui leur est propre, et la transmet au conducteur M.

La machine de Nairne (fig. 49. b.) est également destinée à donner les deux électricités. Comme elle existe dans tous les cabinets, nous croyons devoir en donner ici une description succincte. Elle est formée d'un cylindre creux de glace, de 8 ou 16 pouc. de diamètre, et de 12 ou 24 pouc. de longueur, tournant entre deux piliers de verre verticaux assujettis à une forte table. Deux cylindres en laiton, de même longueur que celui de verre, supportés par des tubes isolants, sont placés à peu de distance de lui. L'un des cylindres porte un coussin qui s'y adapte au moyen d'un ressort métallique, destiné à le presser sur la surface du cylindre de verre. Un taffetas gommé est

cousu sur son bord supérieur pour recouvrir le cylindre et retenir l'électricité qui tend à s'échapper. Le cylindre de métal qui porte le coussin est appelé *conducteur négatif*, et l'autre *conducteur positif.* Veut-on recueillir de l'électricité négative, on met en communication le cylindre positif avec la terre; si l'on désire au contraire de l'électricité positive, on isole seulement le conducteur positif.

Il est inutile de décrire toutes les machines qui ont été successivement imaginées, attendu que les précédentes sont celles qui réunissent toutes les conditions voulues pour obtenir le maximum d'effets.

125. Avant de se servir d'une machine électrique, on doit d'abord essuyer la glace avec une étoffe de laine bien sèche, et dessécher avec des réchauds les colonnes qui servent de supports aux conducteurs. Il faut s'assurer également si les taffetas gommés qui enveloppent le plateau ne sont pas humides. Relativement au choix que l'on doit faire du plateau, il faut qu'il soit le moins hygrométrique possible : cette condition est remplie toutes les fois qu'il est peu alcalin. On doit éviter aussi, si on a pris pour fondant le minium, qu'il y en ait une trop grande quantité, dans la crainte que la glace ne perde de sa faculté isolante.

Une machine ne peut donner aux conducteurs qu'une tension électrique limitée, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

Divers appareils sont nécessaires pour l'usage de la machine électrique : 1° des chaînes et des tiges métalliques; 2° des conducteurs sphériques ou cylindriques en laiton fixés sur des pieds isolants, que l'on puisse facilement transporter; 3° des excitateurs, qui sont des tiges métalliques, avec des manches isolants tournant à charnière autour d'un centre commun; pour en faire usage, on prend un de ces manches dans chaque main, et l'on ouvre plus ou moins les branches, suivant la distance des deux conducteurs que l'on veut mettre en

communication avec les deux extrémités. On a donné à ces derniers appareils le nom d'*excitateurs*, parce qu'ils servent à tirer des étincelles, à les exciter d'un corps sur un autre. On varie la forme des excitateurs, mais le principe de construction est le même.

§ II. *Théorie de la machine électrique.*

126. Le frottement du plateau de verre entre les coussins ne suffit pas pour dégager de l'électricité, il est nécessaire de les enduire préalablement d'une composition métallique, qui excite plus ou moins la puissance électrique. Cette composition métallique est ou le deuto-sulfure d'étain ou un amalgame composé de six parties de mercure, deux de zinc et une d'étain. Si l'on emploie le deuto-sulfure, on se borne à en frotter les coussins; quant à l'amalgame, on l'applique dessus avec du saindoux. Dans ce dernier cas, il faut avoir l'attention d'enlever les taches ou lignes noires qui se déposent sur le plateau, et de nettoyer de temps à autre les coussins pour enlever la poussière des corps environnants, qui finissent par y adhérer fortement.

On a cherché à expliquer l'usage des compositions métalliques. Quelques personnes ont pensé que l'électricité produite était due uniquement à la nature des deux corps, et n'ont vu là qu'un effet de frottement ordinaire; d'autres ont avancé, au contraire, qu'elle devait être attribuée aux altérations chimiques qu'éprouvent ces compositions. Voyons quelle est l'explication que nous pouvons adopter dans l'état actuel de la science.

Wollaston, comme nous l'avons déjà vu, s'est prononcé un des premiers en faveur de l'origine chimique. Voici les raisons qu'il a fait valoir pour soutenir son opinion :

Si l'on applique sur les coussins de la machine électrique un amalgame d'argent, de platine, ou d'or, de métaux enfin qui ne s'oxident pas spontanément, il n'y

a aucun signe d'électricité; tandis qu'en employant des amalgames de métaux oxidables, les effets sont toujours très-marqués. Il a trouvé que l'amalgame de zinc produit plus d'effet que celui d'étain, et que le meilleur est celui qui renferme un mélange de zinc et d'étain.

Je rappellerai encore ici, que pour s'assurer jusqu'à quel point l'oxidation facilite la production de l'électricité, il a fait monter une petite machine électrique composée d'un cylindre, d'un coussin, d'un conducteur, dans un vase où l'on pouvait changer l'air à volonté et y introduire un gaz quelconque. Avec de l'acide carbonique, il lui fut absolument impossible d'obtenir aucun signe d'électricité; mais ces signes reparurent aussitôt qu'il fit rentrer de l'air atmosphérique. On a avancé, à la vérité, depuis, que le dégagement avait lieu, quoiqu'à un faible degré, dans le gaz acide carbonique desséché; ainsi cette expérience aurait encore besoin d'être répétée.

Les expériences de Wollaston prouvent que l'action chimique exerce au moins une grande influence sur le dégagement de l'électricité dans les machines électriques, si toutefois elle n'est pas une des causes les plus déterminantes.

Nos connaissances actuelles nous permettent de préciser davantage les faits. Nous avons vu, dans le chapitre III, qu'il y a dégagement d'électricité dans les corps, toutes les fois que leurs molécules perdent leur position naturelle d'équilibre par l'effet de la chaleur, des réactions chimiques ou d'un ébranlement mécanique. Les deux premières causes ont chacune leur mode d'action; la troisième est dépendante de l'une et de l'autre, et particulièrement de la première, car il peut y avoir ébranlement sans action chimique, tandis que l'ébranlement ne peut exister sans dégagement de chaleur. Revenons un instant sur cette question.

Les phénomènes thermo-électriques prouvent que lorsque la chaleur se propage dans les métaux cristallisés, et probablement dans tous les corps, il se manifeste

des courants électriques qui sont dus à des différences dans le mode de propagation, suivant telle ou telle direction. D'après cela, quand on frotte l'un contre l'autre deux corps, dont la nature est différente ainsi que l'état des surfaces, la chaleur qui se dégage ne doit pas se répartir également dans chacun d'eux; il peut alors en résulter une séparation des deux électricités. C'est ainsi qu'en frottant un morceau de verre poli contre un autre qui est dépoli, celui-ci doit s'échauffer davantage, parce que les particules de sa surface sont plus ébranlées, et qu'elles ont un pouvoir absorbant pour la chaleur plus grand que celles de la surface polie; elles se trouvent donc dans les circonstances voulues pour prendre l'électricité négative, comme l'indique l'expérience. Les phénomènes de chaleur peuvent donc, à la rigueur, suffire pour expliquer le dégagement de l'électricité; mais d'un autre côté, les expériences de Wollaston prouvent qu'il faut encore faire intervenir l'action chimique.

Je rappellerai, à cette occasion, que nous ignorons la limite où des réactions chimiques cessent de s'opérer dans le frottement mutuel de deux corps; peu de recherches ont encore été faites à cet égard. Ces réactions sont beaucoup plus étendues qu'on ne l'a pensé jusqu'ici, et il n'est pas improbable que la plupart du temps le dégagement de l'électricité, dans le frottement, soit le résultat d'effets électro-chimiques. Interrogeons les faits, qui doivent seuls nous servir de guide.

Si l'on porphyrise dans un mortier d'agate un cristal de mésotype, qui est un double silicate d'alumine, la poussière donne la réaction alcaline, non-seulement avec les infusions de chou rouge et le bois de campêche, mais elle rougit encore le papier de curcuma. L'effet produit est dû à l'alcali mis en liberté par l'effet de la trituration, et non à l'action des matières colorantes sur la mésotype.

Le basalte, le feld-spath et différentes laves qui renferment de la potasse ou de la soude, laissent également

échapper une petite portion de leur alcali par la porphyrisation, mais à un degré moindre que la mésotype.

Le fer oligiste, plusieurs silicates non alcalins, le cristal de roche, ainsi que d'autres substances, quand elles ont été préalablement chauffées, puis lavées avec de l'eau distillée, ne donnent pas la réaction alcaline.

La pyrite, soumise au même mode de traitement, donne naissance à du proto-sulfate de fer.

Le deuto-sulfure d'étain, celui-là même dont on se sert pour enduire les coussins des machines électriques, se change peu à peu, par la trituration dans un mortier d'agate, en sous-sulfate acide d'étain ; il en est encore de même quand on frotte, sur une plaque de cristal de roche, un tampon de peau, recouvert de deuto-sulfure d'étain. Il faut donc que, pendant la friction, les deux éléments du sulfure se soient oxidés aux dépens de l'oxigène de l'air.

Les faits que nous venons de présenter montrent que les corps peuvent se décomposer par le frottement ou la trituration. On ignore encore jusqu'à quel point la chaleur qui est dégagée concourt à cette action ; mais le fait en lui-même, quelle que soit la cause qui le produise, paraît démontré.

Si nous nous reportons maintenant à l'influence bien constatée des compositions métalliques pour exciter la puissance électrique dans le frottement, nous dirons d'abord, que dans le frottement des coussins recouverts de deuto-sulfure d'étain sur le plateau de la machine, il y a production d'un composé acide, résultant de la combinaison de l'oxigène de l'air avec le soufre et l'étain. Si l'on rapproche ce résultat du fait observé par Wollaston, que la machine électrique ne fonctionne pas dans le vide, ou excessivement peu, nous voyons que l'air qui adhère à la surface du plateau cède au soufre et à l'étain son oxigène; pendant cette réaction, l'oxigène prend l'électricité positive et la transmet au corps auquel il adhère, c'est-à-dire au plateau de verre, tandis que les bases laissent

échapper de l'électricité négative dont s'empare le frottoir. Nul doute que ces effets n'aient lieu dans la machine électrique : sont-ils les seuls qui concourent à la production de l'électricité? Nous n'osons l'affirmer.

Je ferai remarquer que lorsqu'on aura des moyens plus précis que ceux que nous possédons pour constater les plus faibles changements chimiques, on rapportera probablement à des réactions chimiques un grand nombre d'effets électriques de frottement.

Quelles que soient les causes déterminantes du dégagement de l'électricité par friction, l'intensité de l'électricité dégagée dans une machine quelconque a toujours une limite qui ne saurait être dépassée. Supposons que le plateau, après avoir été frotté entre les coussins, ait communiqué aux corps environnants l'électricité qu'il a acquise, le plateau ira se charger de nouveau et continuera à transmettre aux conducteurs de l'électricité positive, jusqu'à ce que la tension de celle-ci soit la même et sur le verre et sur les conducteurs; quand on aura atteint ce terme, il sera impossible de leur donner plus d'électricité, ils reprendront seulement au plateau la quantité qu'ils auront perdue à chaque instant dans l'air.

§ III. *Des machines électro-magnétiques.*

127. Nous avons vu que M. Faraday avait découvert que les aimants naturels ou artificiels jouissaient de la propriété de produire des courants par influence, ou, pour nous servir de ses expressions, par induction, dans un fil de métal, situé à une distance convenable. Il a fait voir aussi que l'on pouvait obtenir, dans les mêmes circonstances, une étincelle électrique.

Après cette découverte importante, plusieurs physiciens ont cherché à disposer un appareil pour obtenir une suite continue d'étincelles avec un aimant. Parmi les machines électriques construites sur ce principe, je citerai particulièrement celle de M. Pixii fils,

qui a eu l'idée de faire changer continuellement de place à l'aimant par rapport à l'étrier fixe, au moyen d'un mouvement très-doux à produire. Voici la description de cette machine :

Les deux pièces principales (fig. 50) sont un aimant en acier trempé et un étrier en fer à cheval (fer doux), sur chacune des branches duquel est enroulé un fil de cuivre recouvert de soie. La partie inférieure de l'aimant, qui est coudée, est fixée à un axe vertical, auquel on imprime un mouvement de rotation. L'étrier est fixe ; la partie supérieure est coudée, et ses branches verticales viennent affleurer celles de l'aimant, sans néanmoins les toucher. On fait tourner l'aimant, au moyen d'une manivelle et d'une roue d'angle verticale qui engrène un pignon horizontal de même axe que l'aimant, lequel axe est au-dessous du coude de cet aimant. Le tout est monté sur un châssis en bois.

L'un des bouts du fil de cuivre enroulé sur l'étrier plonge dans une capsule contenant du mercure, posée sur la traverse supérieure du châssis ; et l'autre bout est placé très-près de la surface du mercure. Lorsqu'on fait tourner la roue d'angle, le choc des dents de cette roue contre celles du pignon fait varier le châssis, et ce petit mouvement se communiquant à la surface du mercure, le bout du fil de cuivre voisin de cette surface est alternativement dans l'air et dans le mercure ; et lorsqu'il sort du flot de mercure, on aperçoit, à son extrémité, l'étincelle électrique. L'aimant tournant rapidement sur son axe, les étincelles se succèdent sans interruption.

A chaque demi-révolution de l'aimant, les deux bouts polaires nord et sud de cet aimant sont en conjonction avec ceux de l'étrier aimanté par influence ; c'est pourquoi deux étincelles successives sont dues à des électricités contraires. Je donnerai ici les dimensions des principales pièces de la machine électro-magnétique qui a été construite par M. Pixii. L'aimant, en acier trempé, du poids de deux kilogrammes, en porte $12\frac{1}{2}$; sa section transversale est un rectangle dont les côtés ont 10 et

35 millimètres. Sa hauteur, dans le sens de l'axe vertical de figure et de rotation, est de 21 centimètres; l'ouverture, ou l'écartement des pôles, de 2 centimètres.

L'étrier est une pièce cylindrique de fer doux coudée en fer à cheval; le diamètre des branches parallèles est de 13 millimètres, la hauteur de ses branches, d'environ 8 centimètres. La longueur du fil de cuivre enroulé sur l'étrier est de 50 mètres, et son poids d'un quart de kilogramme.

§ IV. *De l'étincelle électrique.*

128. Jusqu'ici nous n'avons considéré le fluide électrique que sous le rapport des attractions et répulsions, et de son état d'équilibre sur la surface des corps; mais il se manifeste encore à nos yeux par d'autres propriétés, dont nous devons parler à l'occasion des machines électriques.

Lorsqu'on approche d'un corps conducteur un tube de verre suffisamment électrisé, on voit s'élancer avec explosion, du tube vers ce corps, une étincelle qui est le résultat de la réunion des deux électricités. Dans les temps secs, on aperçoit sur le frottoir, à mesure que l'on promène le tube, une lueur bleuâtre. Avec la machine électrique les effets sont plus marqués et l'étincelle est visible, même en plein jour; elle est accompagnée en outre d'une odeur caractéristique de soufre et de phosphore, que l'on peut rapporter peut-être aux changements chimiques qui s'opèrent dans le frottement. Ce qui m'engage à émettre cette opinion, c'est qu'en frottant les coussins avec du deuto-sulfure d'étain, le plateau conserve la même odeur pendant quelques instants, après que l'étincelle a paru. En général, le fluide électrique n'émet aucune lumière lorsqu'il est en équilibre sur un corps; cette lumière ne se manifeste à nos yeux que lorsqu'il est en mouvement, et dans le cas encore où les deux fluides ont une tension suffisante. L'électricité, qui se dégage de nos

machines ordinaires, en s'écoulant dans la terre par un fil métallique, ne donne aucune lueur, toutes les fois que cet écoulement peut s'effectuer sans difficulté; mais il n'en est pas de même quand on opère avec une machine très-puissante.

Van Marum, dans la description qu'il nous a donnée de la grande machine du Musée de Tayler, dit que l'électricité qui s'en écoule, dans le sol, par un fil de métal de cinquante pieds de longueur, l'entoure d'une lueur brillante. Cette lueur provient de l'action sur les corps environnants de la portion de l'électricité qui n'a pu s'écouler dans le sol.

La tension de l'électricité qui est nécessaire pour produire de la lumière, dépend, comme nous allons le voir, d'un grand nombre de causes, mais particulièrement de la nature des corps, de leur forme, et des milieux gazeux que traverse la décharge électrique.

Avec les corps anguleux, il faut une tension moins grande que pour des corps de forme arrondie. Une condition indispensable, dans les deux cas, est que la tension de l'électricité soit suffisante pour vaincre la résistance de l'air. Une machine très-forte donne des étincelles depuis 20 jusqu'à 30 pouces de longueur.

Pour montrer les diverses propriétés de la lumière électrique, on est dans l'habitude de se servir de plusieurs appareils, qui se trouvent dans tous les cabinets.

Les tubes étincelants sont des tubes sur lesquels on colle en spirale de petites losanges en étain, dont les pointes sont très-rapprochées les unes des autres; à leurs extrémités sont fixées des boules de métal qui communiquent avec les losanges les plus rapprochées. Si l'on tient à la main un de ces tubes, par un des bouts, et que l'on tire de l'autre des étincelles d'une machine électrique, on les voit jaillir en même temps entre toutes les pointes, et le tube paraît lumineux. Nous passons sous silence d'autres appareils, tels que les carreaux étincelants, magiques, etc., dont la construction repose sur le même principe.

L'électricité négative, en s'écoulant par des pointes, ne donne jamais des aigrettes aussi brillantes, aussi divergentes et aussi alongées que l'électricité positive. Elle se montre sous la forme d'un trait de feu, qui se divise à une certaine distance en rayons étincelants.

Le fluide électrique n'est retenu à la surface des corps que par la pression de l'air, mais si on lui fait traverser un tube, dans lequel on a fait le vide, il se dissipe, et toute la capacité intérieure se trouve alors remplie d'une lumière plus ou moins vive.

130. Les couleurs de la lumière électrique varient suivant la nature des corps, la force de l'étincelle et la pression des gaz qu'elle traverse. En général, les étincelles sont d'autant plus brillantes que les substances entre lesquelles elles éclatent conduisent mieux l'électricité. Le bois et d'autres corps mauvais conducteurs ne produisent qu'un courant faible et d'une couleur rouge. L'expérience suivante, qui est rapportée par Singer (1), mérite d'être signalée.

Soit un morceau de bois de sapin, peu résistant, d'environ trois pouces de long et d'un pouce et demi dans ses autres dimensions; on enfonce obliquement à sa surface dans le sens des fibres du bois et à une profondeur d'à peu près un huitième de pouce deux pointes en fer un peu longues, placées à une distance d'environ un pouce et demi l'une de l'autre. Si l'on fait passer une forte étincelle à travers le bois, pour se porter d'une pointe à l'autre, la lumière qui en résulte prend des couleurs différentes, suivant qu'elle traverse une portion de bois plus ou moins profonde. En enfonçant une pointe plus que l'autre, afin que l'étincelle passe obliquement, on peut apercevoir toutes les couleurs du prisme à la fois. Cette expérience fait spectacle.

Cette modification dans les teintes de la lumière électrique se retrouve quand certains corps brûlent, selon

(1) Éléments de l'Électricité, traduction française, p. 104.

que la combustion est plus ou moins vive. Le soufre, par exemple, quand il commence à brûler, donne une lumière violette, comme celle d'une faible électricité; elle est blanche au contraire lorsqu'il est fortement embrasé.

131. Quand l'électricité a une grande tension, les étincelles dans l'air sont longues, et forment des lignes continuellement brisées et courbes; cet effet tient à ce que le fluide électrique, se mouvant avec une extrême rapidité, condense l'air qui est en avant de lui, et le rend par conséquent, dans cette direction, plus résistant que celui qui est placé latéralement.

La lumière devient blanche et brillante lorsque l'on condense l'air; elle se divise, s'affaiblit, et prend une teinte rougeâtre en le raréfiant. Les différents gaz n'ont d'autre action que celle qui est relative à leur densité : ainsi l'étincelle est blanche et vive dans le gaz acide carbonique, rouge et faible dans le gaz hydrogène, comme dans les cas où l'électricité n'est retenue que faiblement sur la surface des corps.

On observe les effets de la lumière dans le vide et les gaz avec des tubes de 8 ou 10 pieds de longueur, dans lesquels on peut faire le vide à volonté et y introduire les corps gazeux. L'une des extrémités est mise en communication avec la machine, au moyen d'une petite boule de métal vissée sur la virole, et l'autre avec le sol.

On se sert aussi d'un appareil qu'on nommait jadis *œuf électrique*, fig. 50 bis, lequel est formé d'un vase en verre de forme ellipsoïde, à l'une des extrémités duquel est adapté un tube à robinet, et à l'autre une tige à bouton passant dans une boîte à cuir. On fait le vide à volonté, en vissant le tube sur la platine d'une machine pneumatique.

Lorsqu'on veut observer les effets de l'électricité dans un vide, aussi parfait que celui que nous pouvons produire, on opère dans le vide barométrique.

Les premiers effets de ce genre ont été observés par Picard, en 1660. En agitant le mercure dans un baromètre, il fut étonné de voir une apparence lumineuse se

répandre dans la partie vide. Cette apparence était due à l'électricité que le mercure très-sec dégageait dans son frottement contre les parois du tube.

132. La couleur varie, avons-nous dit, suivant la nature des corps, c'est-à-dire suivant leur degré de conductibilité. En voici des preuves : des étincelles tirées à travers des balles de bois ou d'ivoire ont une couleur cramoisie ; celles que l'on tire de la surface d'un cuivre argenté ont une teinte verte et brillante ; une longue étincelle qui passe sur le charbon en poudre est jaune. On a cherché à décomposer l'électricité avec le prisme ; on y a retrouvé à la vue simple toutes les couleurs qui composent la lumière solaire ; mais, en observant le spectre avec une bonne lunette, on a trouvé qu'il manquait des teintes, qui ne sont pas celles dont le spectre solaire est privé.

133. Davy s'est occupé de recherches sur la lumière électrique, dans l'espoir de remonter à la cause qui la produit. Il s'est appliqué surtout à constater jusqu'à quel point la présence de la matière pondérable, dans le milieu traversé par la décharge électrique, est nécessaire à la production des effets lumineux. Il a pris un tube recourbé (fig. 51), ayant une branche fermée et plus longue que l'autre. Un fil de platine fut soudé à l'extrémité de la branche fermée, de manière qu'une partie était en dedans et l'autre en dehors. Ce tube, au moyen de viroles et de vis convenables, pouvait être adapté à un récipient dans lequel on pouvait faire le vide. La branche du tube fermée ayant été remplie de mercure récemment purifié, on fit le vide dans la branche ouverte ; en tournant un robinet convenablement placé pour établir une communication avec le récipient, il était facile de se procurer un vide d'une grande ou d'une petite étendue, en tournant le robinet ; afin d'empêcher que le mercure ne descendît trop. Après plusieurs essais, il trouva que la colonne privée de la plus petite partie d'air possible, était perméable à l'électricité ; que l'on y apercevait des apparences lumineuses, soit avec

l'étincelle ordinaire, soit avec le choc d'une bouteille de Leyde; que la garniture en étain qui enveloppait extérieurement le tube se chargeait d'électricité et que les répulsions et les attractions avaient lieu également dans le vide le plus parfait. Lorsqu'on élevait la température du mercure, en plaçant la branche recourbée du tube sur un réchaud ou dans un bain de mercure, la lumière électrique paraissait dans la vapeur avec une couleur verte, vive, et de grande intensité. En élevant graduellement la température jusqu'à l'ébullition du mercure, la décharge d'une batterie de quelques bocaux y produisait une lumière dont l'éclat était des plus brillants. A mesure que la température diminuait, la couleur perdait sa vivacité, et à 20° au-dessous de zéro du thermomètre de Far., la lumière était si faible, qu'on ne pouvait l'apercevoir que dans une obscurité très-profonde. Pendant l'ébullition du mercure, le phénomène était des plus éclatants. Pendant la formation et la condensation des globules de vapeur mercurielle, l'électricité produite par le frottement du mercure contre le verre se transmettait à travers la vapeur, avec des étincelles si brillantes, qu'elles étaient visibles en plein jour.

Lorsqu'il introduisait dans le vide mercuriel la plus petite quantité d'air, la couleur changeait du vert au vert de mer; par une nouvelle addition, elle passait au bleu ou au pourpre. Davy a essayé ensuite de faire le vide au-dessus de l'alliage fusible de bismuth et d'étain, afin de ne pas avoir de quantités appréciables de matières pondérables en vapeur; la lumière, dans ce dernier cas, était jaune et de la phosphorescence la plus pâle.

En faisant le vide avec l'huile d'olive et le chlorure d'antimoine, Davy a trouvé que la lumière produite par l'électricité à travers la vapeur du chlorure était plus grande que celle qui avait lieu dans la vapeur d'huile. Ces expériences l'ont mis à même d'exprimer l'opinion suivante sur l'origine de la lumière et de la chaleur dans les décharges électriques : ces deux effets dépendent

principalement de propriétés qui appartiennent à la matière pondérable à travers laquelle elles sont transmises; mais l'espace où il n'y a pas de quantité appréciable de cette matière est capable également de produire les phénomènes électriques. Ces faits lui ont paru favorables à l'idée que les phénomènes électriques sont produits par un ou plusieurs fluides très-subtils; mais il ne lui a pas semblé improbable que les particules superficielles des corps qui sont détachées par le pouvoir répulsif du calorique pour former de la vapeur, puissent être également séparées par les forces électriques d'où résultent des apparences lumineuses dans le vide, privé de toute autre matière, uniquement par la destruction de leurs états électriques opposés.

134. Une expérience très-simple démontre, de la manière la plus positive, que la lumière électrique produite par la décharge d'une forte batterie électrique dans le vide, donne une lumière aussi vive et aussi brillante que lorsque la décharge a lieu dans l'air. Il suffit pour cela de prendre un récipient en verre, traversé dans sa partie supérieure par une tige en laiton, qui soit terminé des deux côtés par une petite boule de métal; dans la partie inférieure se trouve une autre tige disposée de la même manière. Ces deux tiges entrent avec frottement dans des boîtes à cuir et peuvent être rapprochées ou éloignées à volonté l'une de l'autre; on les tient à une distance de un à deux centimètres. On prend une batterie d'un certain nombre de bocaux, électrisés à saturation, et après avoir fait le vide dans le récipient, aussi parfaitement qu'il est possible, on met en communication la garniture extérieure avec l'une des tiges, et l'intérieure avec l'autre; la décharge s'opère alors avec les mêmes phénomènes lumineux que ceux que l'on observe dans l'air. Cette expérience prouve que si l'électricité, qui a une tension peu considérable, donne une lumière faible et diffuse dans le vide, cette lumière devient vive et éclatante quand la tension électrique est considérable. Il est difficile d'admettre, dans ce cas, que

la très-petite quantité d'air qui se trouve dans le milieu où se produit l'explosion soit la cause des effets lumineux aussi marqués que ceux que l'on observe.

Voilà où s'arrêtent les expériences et commencent par conséquent les conjectures.

135. Quelle est la cause de la lumière qui accompagne ordinairement le passage de l'électricité d'un corps dans un autre? Cette question est encore un point de controverse entre les physiciens. La lumière est-elle due uniquement à la décomposition ou à la recomposition des deux fluides qui forment par leur réunion le fluide neutre, ou bien résulte-t-elle de leur passage à travers des matières pondérables, qui, étant refoulées sur elles-mêmes, produisent de la lumière et de la chaleur? Dans ce cas-ci l'électricité agirait comme une force mécanique. C'est ce que nous allons examiner.

L'expérience prouve que la densité des milieux, traversés par l'étincelle, influe singulièrement sur l'éclat, l'intensité et la couleur de la lumière; que lorsque cette densité est très-petite, la lumière devient diffuse et rougeâtre; que dans le cas où elle est forte, la lumière est vive et brillante. Ces faits indiquent donc que la matière pondérable modifie singulièrement la lumière électrique, si elle n'est pas la cause du phénomène.

D'un autre côté, l'expérience prouve que dans le vide le plus parfait que nous puissions faire sous des métaux en fusion, dont les particules ne sont pas sensiblement volatiles, il y a encore de faibles apparences lumineuses; si l'on veut les attribuer à la matérialité, il faut donc admettre que les décharges électriques détachent des conducteurs métalliques des particules dont il nous est impossible de reconnaître la présence avec les réactifs chimiques dont nous pouvons disposer et qui servent de véhicules.

Si l'on veut attribuer la lumière produite dans l'air à la compression de ses parties constituantes, nous opposerons l'expérience de M. Thenard, qui prouve que la

compression des gaz ne donne jamais lieu à un dégagement de lumière, et que celui que l'on a observé doit être attribué à la présence de corps étrangers. Depuis que l'on considère les atomes des corps comme possédant chacun une électricité propre, dont l'action est dissimulée au dehors par une atmosphère d'électricité contraire qui l'entoure de toutes parts, on pense que la propagation du fluide électrique s'effectue par une suite de décompositions et de recompositions du fluide naturel qui forme cette atmosphère. La lumière et la chaleur qui accompagnent ce phénomène ne seraient que la conséquence de ces diverses actions.

Soient m, m' deux molécules possédant chacune deux pôles électriques ou un seul avec leurs atmosphères. Dans l'état ordinaire, toutes les forces électriques se font équilibre; mais aussitôt que cet état est rompu, les molécules oscillent, et il s'opère continuellement entre elles des décompositions et recompositions de fluide neutre. Si ces oscillations ont une vitesse suffisante, on aura de la chaleur et de la lumière. Quand un corps conducteur est mis en contact avec un conducteur électrisé, il prend à celui-ci une certaine quantité de son électricité, qui se propage d'une molécule à une autre par une suite de décompositions et de recompositions. Supposons maintenant que la quantité d'électricité transmise soit assez puissante pour paralyser les actions des pôles électriques, il en résultera que les molécules, se trouvant toutes électrisées de la même manière, se repousseront; dès lors il y aura dilatation et séparation de ces mêmes molécules. Dans ce cas, l'élévation de température et la lumière proviendront de la combinaison de toutes les atmosphères. Nous aurons l'occasion de faire remarquer à plusieurs reprises, dans le cours de cet ouvrage, que le fluide électrique, toutes les fois qu'il circule librement dans un fil métallique, ne change ni sa température, ni sa constitution ; mais que pour peu qu'il rencontre des obstacles sur sa route, une portion circule librement, tandis que l'autre cesse d'agir comme force

électrique, et tend à élever la température et même quelquefois à *l'abaisser.*

Il n'a été question, dans ce qui précède, que des effets produits quand les molécules sont ébranlées; mais rien ne s'oppose à ce qu'il ne s'en manifeste de semblables quand l'éther, ou les atmosphères électriques qui le représentent, reçoit un ébranlement. Les phénomènes chimiques qui s'opèrent sous l'influence de la lumière solaire viennent à l'appui de cette conjecture. En général, toutes les causes qui dérangent l'état d'équilibre des molécules ou celui de leurs atmosphères mettent en mouvement une certaine quantité d'électricité, et les disposent à former de nouvelles combinaisons. Nous traiterons plus tard cette question.

136. La question relative à la lumière électrique est maintenant bien posée : les chimistes la font dépendre de phénomènes résultant de propriétés électriques inhérentes aux atomes des corps, et les physiciens, du moins quelques-uns, la considèrent comme l'effet de la compression opérée par l'explosion de l'électricité sur les parties constituantes de l'air, ou les corpuscules qui se trouvent dans les milieux qu'elle traverse. Dans l'état actuel de la science, nous devons admettre l'une et l'autre cause.

CHAPITRE VI.

DES ÉLECTRICITÉS DISSIMULÉES.

§ Ier. *Du condensateur.*

137. Lorsque deux disques A et B (fig. 52), séparés par un plateau de matière isolante, de gomme laque ou de verre, possèdent l'un et l'autre une quantité égale d'électricité contraire, le plateau intermédiaire s'oppose à leur recomposition; mais il n'empêche pas qu'elles n'exercent l'une sur l'autre une action par influence, dont nous avons déja étudié les effets, et qui masque leur action propre sur les corps environnants : on dit alors que les deux électricités sont dissimulées. Au lieu d'un plateau de verre, on peut employer une couche d'air, comme l'a fait Æpinus. Ayant pris pour plateaux deux grandes plaques circulaires de bois, revêtues de feuilles d'étain, il les électrisa chacune différemment, les rapprocha, et remarqua que leurs actions étaient dissimulées. Toutes les fois que l'action attractive des deux fluides est suffisante pour vaincre la résistance que lui oppose le corps isolant, celui-ci est percé en un ou plusieurs points par l'effet de la décharge. Si l'on établit directement la communication entre les deux disques avec un arc métallique, la recomposition des deux électricités s'opère immédiatement. Telles sont les propriétés générales des électricités dissimulées.

Supposons maintenant que les deux disques A et B, qui sont séparés par un disque de matière isolante, soient parfaitement homogèues, et qu'on leur communique la même quantité d'électricité contraire; supposons,

en outre, que le disque intermédiaire soit partout de la même épaisseur, et que l'appareil soit isolé, l'expérience prouve qu'il n'existe aucun point sur chaque disque où la tension soit tout-à-fait nulle. On explique ainsi ce fait : le disque intermédiaire ayant une certaine épaisseur, les deux électricités, qui sont égales en quantités, ne peuvent être dissimulées complétement qu'au contact; lorsqu'elles se trouvent à une certaine distance l'une de l'autre, il faut que l'une soit plus forte que l'autre pour compenser la distance; cela exige qu'il reste une petite quantité d'électricité libre sur l'une des surfaces : en la lui enlevant, c'est l'autre disque qui manifeste l'excès d'électricité libre. Ces décharges successives peuvent être rendues sensibles au moyen de deux pendules formés de petites balles de sureau, suspendues à deux fils de lin écru, et en communication chacun avec l'un des disques. Ces deux pendules, à l'instant où ils touchent les faces des disques, sont repoussés; mais dès l'instant que l'on touche l'un d'eux, le pendule correspondant retombe, et celui de l'autre se relève, comme si celui-ci eût pris une charge nouvelle. Cet effet doit être attribué uniquement à la portion de fluide qui est devenue libre par la perte que l'autre a éprouvée quand on a touché le plateau. La propriété dont jouit l'électricité dissimulée a été mise à profit par Æpinus, pour accumuler de l'électricité sur une surface; en raison de cela, l'appareil a reçu le nom de condensateur.

138. Les deux disques étant électrisés différemment et isolés, si l'on touche alternativement les deux surfaces avec un plan d'épreuve et que l'on porte ensuite dans la balance de Coulomb pour déterminer la tension de l'électricité enlevée, on trouve qu'il existe sur chacune d'elles des quantités d'électricités libres, de nature contraire, qui tendent de plus en plus à devenir égales. En ayant égard aux lois de l'absorption de l'électricité par l'air, on rend compte de ce phénomène par le calcul; mais on peut, au moyen d'une expérience très-simple, montrer cette égalité. Soient BA (fig. 53) une lame de verre verticale,

recouverte sur chaque face d'une lame d'étain, et *ab*, *a'b'* deux petits pendules en communication avec les lames ; l'une des faces est mise en communication avec le sol, l'autre avec une machine électrique qui fonctionne, et l'appareil est abandonné ensuite à lui-même. Aussitôt après, sur la première, le pendule qui était au repos s'élève graduellement, tandis que sur l'autre il s'abaisse peu à peu. Ils arrivent bientôt à un écart qui est sensiblement le même, et tous deux descendent ensuite très-lentement, de la même quantité. Ces effets sont faciles à expliquer.

139. Quand l'un des disques est seul électrisé, et que l'autre est à l'état naturel et communique avec le sol, il se produit des effets que nous pouvons expliquer en nous reportant au principe exposé dans le chapitre IV.

Supposons que l'on ait donné à la face A un excès d'électricité positive ; cette électricité décomposera l'électricité naturelle de B, attirera son électricité négative et repoussera la positive dans le sol, laquelle agira aussi de la même manière sur l'électricité qui l'avoisine, et ainsi de suite ; il en résultera donc de l'électricité négative dissimulée en *c c*, qui sera toujours moindre en quantité que l'électricité positive du disque A. Il suit de là que, lorsqu'on enlèvera la chaîne *a a'*, la face A, dans les premiers instants, donnera, comme nous l'avons vu précédemment, de l'électricité au plan d'épreuve ; mais l'air ne tardant pas à lui enlever cet excès d'électricité, ce sera ensuite au tour de la face B à avoir un excès d'électricité libre, et successivement, jusqu'à ce que l'état électrique des deux faces soit sensiblement le même. En faisant communiquer l'une d'elles avec une source d'électricité, on peut accumuler sur l'autre une certaine quantité d'électricité dont la tension est un peu moindre que celle de l'autre : c'est en raison de cette propriété qu'on a donné à cet appareil le nom de condensateur. Le condensateur est ordinairement composé de deux disques de métal, séparés par un disque isolant.

Quand le disque isolant est en verre, il faut, à cause de son épaisseur, donner à l'un des plateaux un excès

assez fort d'électricité, pour que l'autre puisse se charger. On se sert peu de ce condensateur, à cause de l'humidité dont se recouvre le verre, qui devient alors conducteur.

Le condensateur à taffetas gommé est employé quand il s'agit de recueillir de l'électricité dont la tension n'est pas très-énergique; il est formé de deux pièces, d'un plateau en bois recouvert de taffetas gommé, et d'un plateau métallique qui est muni d'un manche isolant, sur lequel on le pose. Ce dernier communique, au moyen d'une chaîne métallique, avec la source d'où émane l'électricité, laquelle agit par influence sur l'électricité naturelle du bois qui communique avec la terre. En enlevant le disque, on le trouve chargé d'une électricité assez intense, de même nature que celle de la source. Le taffetas gommé étant beaucoup plus mince, rend plus facile le jeu des forces électriques par influence.

En général, l'effet est d'autant plus marqué que le corps isolant intermédiaire est plus mince; c'est d'après ce principe que Volta a conçu l'idée d'un condensateur propre à recueillir de très-faibles quantités d'électricité. L'appareil qu'il a construit à cet effet se compose d'un électroscope à lames d'or, et de deux plateaux métalliques bien dressés autour, et recouverts sur leur surface de contact de plusieurs couches de vernis à la gomme laque. Le plateau inférieur est vissé sur l'électroscope, et le plateau supérieur est muni d'un manche isolant de verre. Les couches de vernis remplacent le plateau de verre et le taffetas gommé; mais comme ces couches sont excessivement minces, et que les plateaux métalliques joignent aussi bien que possible, il en résulte que leur force condensante est considérable. Le plateau inférieur est appelé collecteur, parce qu'il sert à rassembler l'électricité. Il faut avoir l'attention d'enlever le plateau supérieur perpendiculairement et sans produire de frottement. Souvent aussi, une petite quantité d'électricité pénètre dans les couches de vernis, et ne s'en dégagent que difficilement : on place alors entre les deux disques une feuille très-mince d'étain, soit pour l'enlever, soit pour

opérer, par son intermédiaire, la recomposition des deux électricités contraires, s'il s'en trouve sur les couches de vernis. Cet appareil ne doit être employé que pour recueillir de très-faibles charges d'électricité; car si elles sont trop fortes, elles percent la couche de vernis. Je renvoie au chapitre II pour de plus amples détails sur sa construction et son usage.

La quantité d'électricité que peut accumuler un condensateur est directement proportionnelle à la surface des plateaux, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante; car on conçoit, d'une part, que plus les disques ont d'étendue, plus ils peuvent recevoir d'électricité, puisque chaque point de leur surface reçoit une certaine portion d'électricité, et de l'autre, que moins la lame intermédiaire est épaisse, plus les actions par influence sont énergiques. Néanmoins, il y a des limites qu'il est impossible de dépasser : si les surfaces ont trop d'étendue, la construction des disques devient très-difficile, ainsi que leur manœuvre; donne-t-on à la lame isolante trop peu d'épaisseur, elle n'est plus un obstacle à la recomposition des deux électricités, puisqu'elles peuvent la percer.

La force condensante peut être représentée par le rapport entre la quantité totale d'électricité que possède le plateau supérieur, et celle qui se trouve sur l'autre; rapport que l'on peut facilement trouver avec un plan d'épreuve et la balance de Coulomb, en suivant les méthodes que nous avons indiquées. Il suffit d'isoler l'appareil et de charger l'un des plateaux d'une quantité quelconque d'électricité, tandis que l'autre communique avec le réservoir commun. Après avoir rompu la communication, on sépare avec soin les plateaux, en les tenant avec leurs manches isolants, et on mesure leur charge électrique en les touchant avec le plan d'épreuve, que l'on porte ensuite dans la balance. Le rapport entre les électricités des deux disques exprime la proportion de saturation ; plus la fraction qui le représente approche de l'unité, plus les quantités d'électricité

qui se trouvent sur chacun des plateaux approcheront d'être égales, et moindre sera l'excès d'électricité libre sur le plateau collecteur; plus sera grande en même temps la force condensante.

§ II. *De l'électrophore ou porteur d'électricité.*

140. Le condensateur a reçu aussi une autre destination que celle d'accumuler de très-faibles quantités d'électricité sur un disque de métal; on l'emploie aussi à charger fortement le même disque, quand il est en communication avec un gâteau de résine de 5 ou 6 pouces de diamètre, renfermé dans une enveloppe faite avec un corps mauvais conducteur et que l'on électrise préalablement par frottement : dans ce cas, on donne à l'appareil le nom d'*électrophore*, qui signifie porteur d'électricité.

Supposons le gâteau de résine électrisé avec une peau de chat, on pose dessus le disque de métal, et on le retire ensuite, en le tenant par son manche isolant; il ne possède alors aucune charge, bien qu'il ait été mis en contact avec un corps électrisé; ce corps étant un mauvais conducteur, ne lui cède aucune partie de son électricité, mais il exerce sur lui une action par influence. L'électricité négative du gâteau, en réagissant sur l'électricité naturelle du disque, attire à elle l'électricité positive, avec laquelle elle ne peut se combiner en raison de la mauvaise conductibilité de la résine, qui ne lui permet pas de franchir la surface de contact; l'électricité négative est chassée loin de cette même surface. Si on enlève le disque, les deux électricités se recombinent aussitôt, et tout rentre dans l'état naturel : mais il n'en est plus de même quand on touche le disque avec le doigt, avant de l'enlever, parce que l'on donne écoulement, dans le sol, à l'électricité négative. En retirant de nouveau le disque, l'électricité positive devient libre, et sa tension est suffisante pour donner des étincelles.

La différence qui existe donc entre un condensateur et un électrophore est que, dans le premier, on se sert d'un conducteur non isolé, pour augmenter la charge d'un corps électrisé; tandis que, dans l'autre appareil, c'est le corps isolé et électrisé qui détermine cette accumulation.

Cet appareil conserve, pendant plusieurs mois, la propriété de donner des étincelles, sans avoir besoin de frotter la résine. Il est employé fréquemment dans les laboratoires de chimie pour les expériences eudiométriques.

Lorsqu'on veut se procurer de l'électricité négative, on charge le gâteau de résine d'électricité positive en le mettant en contact avec le conducteur d'une machine électrique.

Lichtemberg, physicien allemand, a fait avec l'électrophore une expérience curieuse que je ne dois pas oublier de mentionner ici. Ayant tracé des figures sur la surface du gâteau de résine avec une tige métallique, possédant tantôt une électricité, tantôt l'autre, il projeta dessus, au moyen d'une espèce de soufflet, un mélange de soufre et de minium triturés ensemble; les parcelles de soufre se rendirent sur les figures négatives, et le minium sur les figures positives. L'explication de ce phénomène est facile : pendant leur projection, les poussières s'électrisèrent par leur frottement mutuel, le soufre prit l'électricité positive, et le minium l'électricité négative : ces deux corps durent donc se porter sur les figures possédant l'électricité contraire à la leur.

§ III. *De la bouteille de Leyde et des batteries électriques.*

141. On peut obtenir des décharges électriques énergiques avec le condensateur, en faisant communiquer une des faces métalliques avec une machine électrique, et l'autre avec le sol. Si ces décharges passent à travers le corps, on éprouve dans tous les organes qui se trouvent sur le trajet de l'électricité une secousse d'autant plus

vive que le condensateur est plus grand, la charge plus considérable, et l'intervalle entre les plateaux moindre; mais comme on ne peut augmenter indéfiniment l'étendue des surfaces, on est forcé d'avoir recours à d'autres appareils dont la construction repose sur le même principe, si l'on veut se procurer des décharges plus considérables que celles que l'on obtient avec le condensateur ordinaire. Le premier appareil de ce genre est la bouteille de Leyde, qui joue un si grand rôle dans l'histoire de l'électricité. Cette bouteille (53 bis) se compose d'un flacon en verre, revêtu extérieurement d'une feuille d'étain qui monte jusqu'à quelques centimètres du goulot et est rempli intérieurement de feuilles de clinquant chiffonnées, de grenailles de plomb, ou d'une substance conductrice dont la surface peut être aussi étendue qu'on le veut, pourvu qu'elle occupe un petit espace. Le haut de la bouteille est recouvert d'une couche de vernis à la gomme laque. Une tige en laiton, dont le bout supérieur est tourné en crochet, passe dans le bouchon du goulot pour se rendre dans l'intérieur. On donne ordinairement le nom d'armature extérieure à la lame d'étain qui est appliquée sur le verre. Cette bouteille est un véritable condensateur, dans lequel les parois remplacent le plateau isolant. Veut-on la charger, on la prend dans une main par l'armature extérieure, et l'on met en communication le crochet avec une machine électrique. Celle-ci donne continuellement à la surface intérieure de l'électricité positive, qui agit par influence sur l'électricité naturelle de la main et de la terre, à la manière des condensateurs; de sorte qu'il s'accumule sur les deux surfaces une quantité considérable d'électricités contraires. Aussitôt que l'on établit la communication, au moyen d'un excitateur, entre le crochet et l'armature extérieure, il y a recomposition immédiate des deux fluides, laquelle est accompagnée d'un choc plus ou moins fort, suivant la charge; quand celle-ci est trop forte, le verre est quelquefois percé, ou bien la décharge s'opère naturellement du crochet à la feuille d'étain : c'est pour

éviter cet inconvénient que l'on tient l'armature extérieure à quelques pouces de distance du goulot. Le verre ne perdant pas entièrement sur-le-champ les deux électricités qui adhéraient aux deux surfaces, il s'ensuit qu'en employant plusieurs fois l'excitateur, même après un temps assez long, on obtient encore des décharges assez sensibles. On mesure la charge d'une bouteille de Leyde avec l'appareil décrit figure 12.

Si l'on suspend dans l'air, avec un cordon de soie, une bouteille de Leyde électrisée, l'action absorbante de ce fluide n'agit que sur les quantités d'électricité qui se trouvent successivement libres sur chacune des garnitures, puisqu'elle ne peut rien sur celles qui sont dissimulées; aussi, avec le temps, la bouteille se trouve-t-elle complétement déchargée.

En plaçant la bouteille de Leyde sur un plateau de résine et la prenant ensuite par son crochet, on rend libre sur la garniture extérieure une certaine quantité d'électricité négative. On se sert souvent de ce procédé pour se procurer de l'électricité négative.

Pour décharger une bouteille de Leyde, on se borne à mettre en communication l'intérieur avec l'extérieur au moyen d'une chaîne de métal, sans craindre que la décharge s'opère à travers le corps, attendu que l'électricité suit toujours les meilleurs conducteurs; mais il est nécessaire de s'assurer préalablement que la chaîne n'a pas de solution de continuité, et qu'elle est assez grosse pour donner passage à tout le fluide. Dans le cas contraire, si l'on tenait la panse et un bout de la chaîne dans une main, et l'autre bout dans l'autre main, une partie de la décharge passerait par le corps.

Quand la décharge traverse le corps, elle produit ce qu'on appelle la commotion de la bouteille de Leyde. L'effet peut être dangereux dans le cas où les surfaces ont beaucoup d'étendue. Si l'on tient la panse d'une main et que l'on touche le bouton de l'autre, la commotion se fait sentir dans les bras et la poitrine. Avec de fai-

bles charges, on n'éprouve le choc que dans l'avant-bras; avec des charges plus fortes, il se fait sentir au coude; si on les augmente encore, une vive douleur se fait sentir dans la poitrine. Nous reviendrons sur ces effets dans les applications de l'électricité à la physiologie.

142. Si l'on veut se procurer des décharges considérables, on réunit ensemble plusieurs bouteilles d'une dimension plus ou moins grande, en faisant communiquer ensemble les intérieurs avec des tiges de métal t, t', t'' (fig. 54), et les garnitures extérieures avec une lame d'étain qui revêt le fond de la caisse où sont placées toutes les bouteilles. Ces appareils, qu'on appelle batteries électriques, se chargent comme la bouteille de Leyde ordinaire, c'est-à-dire que l'on met en communication l'une des tiges de métal avec la machine électrique, et la surface extérieure avec le sol : pour juger de la charge de la batterie, on adapte un petit électromètre à pendule au conducteur de la machine électrique. Au commencement de l'expérience le pendule est en repos, parce que toute l'électricité qui arrive est dissimulée aussitôt par l'effet de la batterie; mais peu à peu il s'élève, et l'on juge des diverses charges, et par conséquent des divers degrés de tension de l'intérieur des batteries, par l'angle d'écart. On a observé que, pour une épaisseur de verre constante, la force de la batterie croît proportionnellement à l'étendue de la surface : ainsi vingt pieds carrés condensent vingt fois plus d'électricité qu'un seul. La décharge d'une batterie de cette force agit avec une telle énergie sur l'économie animale, qu'il est nécessaire de prendre des précautions dans son emploi.

Nous avons dit que plus une batterie contenait de surface de verre armée, plus on pouvait accumuler d'électricité; il est évident qu'il faut aussi plus de temps pour la charger avec la même machine électrique.

On est dans l'habitude d'employer quelquefois comme batterie électrique un système de bouteilles de Leyde formé de la manière suivante : la première est suspendue par son crochet au conducteur d'une machine électrique; le crochet d'une seconde bouteille est passé dans un anneau fixé au fond de la première, et en communication avec sa garniture extérieure, et ainsi de suite, de sorte que l'armature extérieure de l'une est en communication avec la surface intérieure de l'autre. La description seule de cet appareil indique comment tout ce système peut se charger : on dit alors que l'on charge par cascade. On conçoit, et l'expérience le prouve, que la décomposition des électricités naturelles doit s'affaiblir avec rapidité à mesure que l'on s'éloigne de la première bouteille; de sorte que, lorsqu'il y en a un grand nombre, les dernières n'ont qu'une charge très-faible. Quand on veut décharger tout ce système, on n'a qu'à mettre en communication le crochet de la première avec l'armature extérieure de la dernière. D'après ce mode d'arrangement, on n'obtient que l'effet dû à la décharge des électricités propres à la première et à la dernière, attendu que celles des bouteilles intermédiaires s'effectuent sans produire aucun effet apparent. Il n'en serait plus de même si l'on détachait toutes les bouteilles, et que l'on mît en communication, d'une part, toutes les armatures extérieures, et de l'autre, les surfaces intérieures.

Pour décharger les batteries électriques, on ne doit pas prendre une chaîne de métal, comme pour une simple bouteille de Leyde, à moins de lui donner une grosseur considérable, mais bien l'excitateur à deux branches dont on a déjà parlé figure 48 bis.

On a imaginé un autre mode de batterie, qui revient néanmoins au précédent. On prend plusieurs plaques de verre armées d'une feuille de métal sur les deux faces A, B, A′ et B′, etc., que l'on place parallèlement les unes aux autres, en faisant communiquer, au moyen

de fils métalliques, la surface A de l'une avec la surface B de l'autre, et ainsi de suite. Ce système étant isolé, si la première face communique avec le conducteur d'une forte machine, et la dernière avec le sol, et que l'on rompe ensuite les communications avec le conducteur et le sol, au moyen de tiges isolantes, on a une distribution de l'électricité comme dans la charge par cascade.

Nous avons passé en revue les principales propriétés de l'électricité libre, nous examinerons dans les applications les effets physiques et chimiques qu'elle produit quand elle traverse les corps.

§ IV. *De la pile de Volta; théorie de contact.*

143. Aussitôt que Volta eut découvert les effets électriques produits dans le contact de deux métaux, il chercha à augmenter l'intensité de l'électricité dégagée, en superposant des couples cuivre et zinc les uns au-dessus des autres; mais comme il avait reconnu qu'un zinc entre deux cuivres ne produisait aucun effet, il sépara chaque couple par une bande de drap mouillé, destinée seulement à transmettre d'un couple à l'autre les effets électriques produits dans chacun d'eux. Il reconnut alors, à l'aide de son condensateur, que la tension électrique augmentait à mesure que le nombre des couples devenait plus grand. Ce mode d'arrangement ayant donné à l'appareil la forme d'une pile, il l'appela aussitôt *pile électrique*, et le monde savant, en mémoire de cette grande découverte, *pile de Volta.*

Voici comment il disposa sa pile : il prit deux disques de cuivre et de zinc, de quelques centimètres de diamètre, et les souda sur l'une de leurs faces; puis il posa l'une d'elles sur une planche par la face cuivre ou zinc (prenons la face cuivre); sur la face zinc, il mit une bande de drap, de même diamètre, et trempée

préalablement dans une dissolution de sel marin; puis au-dessus, la face cuivre d'un second couple; sur la face zinc de celui-ci, une seconde bande de drap mouillé, et ainsi de suite. En ayant réuni de cette manière un certain nombre, il mit en communication la face zinc supérieure avec l'un des plateaux du condensateur; il n'eut pas besoin, cette fois, de placer une bande de papier humide entre le zinc et le cuivre du condensateur pour obtenir de l'électricité positive, car il en recueillit une quantité très-notable. Son étonnement redoubla quand, ayant augmenté convenablement le nombre des couples métalliques, il tira des étincelles de son condensateur.

La pile était ainsi formée : cuivre, zinc, drap mouillé; cuivre, zinc, drap mouillé, etc. Il suivit ensuite un ordre inverse, en mettant en communication avec la terre la face zinc du premier couple; la pile fut donc formée ainsi : zinc, cuivre, drap mouillé, etc. Les effets furent inverses, et le condensateur prit un excès d'électricité négative à la face cuivre supérieure.

Volta ne se borna pas à constater que l'électricité positive ou négative allait en croissant de haut en bas, selon que la pile communiquait avec la terre par la face cuivre ou la face zinc, il chercha encore à déterminer le mode de distribution de l'électricité, lorsque les deux extrémités elles-mêmes étaient isolées. Il trouva que, dans ce cas, la tension, quoique faible, allait en diminuant depuis chaque extrémité; que la face extrême zinc possédait le maximum d'électricité positive, et la face cuivre le maximum d'électricité négative. Ce résultat général a de l'analogie avec la distribution de l'électricité dans la tourmaline, quand sa température est montante ou descendante.

144. La découverte de la pile est une des plus belles conceptions de l'esprit humain, en raison de ses importantes applications aux sciences physiques et chimiques. Les travaux multipliés de Volta pour arriver à sa construction et en étudier le mode d'action prouvent

que cette invention est l'œuvre d'un homme de génie, et non l'effet du hasard. La théorie qu'il a donnée de cet admirable appareil l'a empêché, à la vérité, de suivre toutes les conséquences de sa découverte. S'il eût eu l'idée de faire intervenir l'action chimique, ou du moins d'adopter les idées de Fabroni, nous lui devrions probablement la plupart des découvertes qui ont enrichi depuis la science.

Volta employait fréquemment la pile à colonne (fig. 55). Les disques étaient placés entre trois tubes verticaux en verre, montés sur une rondelle en bois et terminés dans la partie supérieure par une semblable rondelle. Deux petites lames de métal, fixées en haut et en bas, mettaient en communication l'une des extrémités de la pile avec le sol et l'autre avec le condensateur.

Il ne s'en est pas tenu néanmoins à cette disposition; il a imaginé un autre appareil, auquel il a donné le nom de *couronne de tasses*, et qui est formé d'une série de verres ou de godets remplis d'une dissolution saline ou acide (fig. 56). On plonge dans chaque vase une des extrémités d'un arc métallique, composé de deux lames zinc et cuivre, soudées par une de leurs extrémités. L'arrangement est tel, que le côté cuivre du premier plonge dans le même verre que le côté zinc du second; le côté cuivre de celui-ci se trouve avec le zinc du troisième, etc. Le premier et le dernier vase représentent les deux extrémités de la pile. Cet appareil, qui occupe un assez grand espace, est employé toutes les fois que l'on n'a pas de batterie sous la main; il offre aussi l'avantage de nettoyer facilement les surfaces des lames, et de pouvoir conserver le liquide dans les tasses, quand l'expérience a cessé, puisqu'il suffit, pour suspendre l'action de l'appareil, d'enlever les arcs.

On doit à Cruickshank un autre mode d'arrangement (fig. 57). Chaque couple zinc et cuivre est cimenté dans des rainures pratiquées aux parois d'une auge, dont la

surface intérieure est recouverte de mastic; les couples sont placés parallèlement les uns aux autres, à une distance de quelques millimètres, de manière à laisser un intervalle, que l'on remplit avec un liquide, pour remplacer les rondelles de drap humide. Cet appareil, auquel on a donné le nom de *cuve ou batterie voltaïque*, est généralement adopté, en raison de la facilité que l'on éprouve à remplacer le liquide interposé. Il arrive quelquefois que la chaleur dégagée par suite de la réaction du liquide sur le zinc, fond le mastic, le déplace, et que le liquide passe d'un intervalle dans un autre; il en résulte que l'action de la pile est altérée et peut même être annulée. Avant de s'en servir, on doit donc examiner avec soin s'il n'existe aucune communication d'une case à l'autre; ordinairement les couples qui entrent dans ces cuves sont des surfaces carrées, depuis six centimètres de côté jusqu'à trois ou quatre décimètres : chaque batterie est composée ordinairement de trente couples cuivre et zinc. On peut voir le procédé pour construire cette batterie dans les Éléments d'électricité de Singer, traduction de M. Thillaye, page 358. Lorsque l'on veut produire de grands effets de tension, on réunit plusieurs piles semblables à la précédente. Cette réunion s'opère en faisant communiquer le pôle positif de l'un avec le pôle négatif d'un autre, au moyen de lames en laiton soudées à des tiges de même métal. Si l'on veut au contraire augmenter la quantité d'électricité, on met en communication les pôles de même nom, afin d'avoir plus de surface : ces deux batteries ont chacune leur mode particulier d'action.

La grande batterie de l'École polytechnique, qui avait été construite par ordre de Napoléon, était composée de six cents paires carrées; chaque paire formée de deux plaques cuivre et zinc de 9 décimètres carrés. Toute la batterie avait 54 mètres carrés; elle a été détruite, dans ces derniers temps, en raison des difficultés que présentait la manœuvre.

Celle de la Société royale de Londres est composée de

deux mille paires, les unes de 6 pouces et les autres de 4 pouces.

On a imaginé une autre pile (fig. 58), qui est fréquemment employée, toutes les fois qu'il s'agit de faire des expériences sur les courants électriques. On prend une cuve en bois, divisée en compartiments par des cloisons de glace ; les plaques de cuivre et de zinc sont soudées à des lames en forme d'arc ; cet assemblage est disposé de manière que les plaques associées se trouvent dans deux cases contiguës : il y a, par ce moyen, dans chaque cellule, une plaque de cuivre et une autre de zinc, qui appartiennent à deux couples séparés. Ces appareils sont composés ordinairement de dix à douze paires de couples, qui sont fixées sur une tige en bois, qui peut être déplacée, de manière à les introduire ou à les retirer des cases.

On peut, si l'on veut, remplacer chaque case par un bocal de verre, dans lequel on met la dissolution, et reployer sur elle-même la plaque ou la lame cuivre d'un couple de manière à entourer avec ces deux faces la plaque zinc de l'autre couple. Cet appareil, qui est représenté fig. 59, est appelé *pile de Wollaston,* du nom de son inventeur. Souvent on ne se sert que d'un seul élément, principalement dans l'électro-dynamique.

La pile en hélice est destinée, comme la précédente, à fournir une grande quantité d'électricité, à petite tension. Nous donnons la description de celle qui a été construite sur les plans de M. Pouillet, pour le Cabinet de physique de la Faculté des sciences (1) : « Sur un cylindre en bois *b* (fig. 60) de 3 pouces de diamètre et de 1 pied de long, on enroule deux lames, l'une en zinc et l'autre en cuivre, qui sont séparées par des bouts de lisière ou drap *l*, joints par de petites ficelles, dont l'épaisseur est un peu moindre que celle de la petite

(1) Éléments de physique expérimentale, par M. Pouillet, t. 1, 2e partie, p. 642.

lisière. On forme ainsi des couples dont les deux éléments ont chacun 50 ou 60 pieds de surface; ces couples sont ajustés dans de fortes barres en fer F′ F″, au moyen des tiges de fer *v f* et des verrous *r r*, etc.... Dans cette disposition, les couples restent fixes; c'est le plancher P et les seaux en bois *s*, *s*, contenant l'eau acidulée, qui montent et qui descendent au moyen des cordes *c d r*, *c′ d′ r′*, du treuil T T′, de la roue dentée R, et de la manivelle M. Les communications sont établies, entre les divers couples, par de larges lames en cuivre *l*, *l*, qui peuvent facilement se dessouder lorsqu'il est nécessaire de démonter l'appareil pour le transporter. La première de ces lames est soudée au zinc du premier couple, et au cuivre du deuxième; la deuxième est soudée au zinc du deuxième couple et au cuivre du troisième, etc. »

Tels sont les appareils voltaïques qui sont maintenant en usage.

145. La question du dégagement et de la distribution de l'électricité dans la pile est une des plus compliquées de la physique, en raison de toutes les causes qui concourent à l'effet général, et dont plusieurs sont fugitives. On ne peut donc la traiter que partiellement et à mesure que les faits se présentent pour éclairer la théorie. Nous commencerons d'abord par exposer celle du contact telle qu'elle a été donnée par Volta, qui a posé en principe que les corps humides ne font seulement que de transmettre les électricités dégagées au contact de deux métaux différents par l'effet de l'action électro-motrice.

Reprenons la construction de la pile. Une plaque de cuivre est d'abord mise en communication avec le sol, et l'on pose dessus une plaque de zinc; le fluide négatif s'écoule dans le sol, tandis que le fluide positif se porte sur le zinc, et s'y accumule jusqu'à ce qu'il ait acquis une tension que nous représentons par 1, l'état du cuivre étant zéro. La différence entre les états électriques des deux disques est donc 1, et nous lui supposerons

toujours cette valeur. Cette hypothèse est la base de la théorie de Volta.

Plaçons maintenant sur la face zinc une rondelle de drap humide ; elle partagera l'électricité du zinc, et celle-ci en prendra aussitôt au cuivre, afin de compléter celle qui lui est nécessaire pour son état d'équilibre : il en sera de même en posant une lame de cuivre sur le drap mouillé.

Si, sur la seconde lame de cuivre, on pose une nouvelle lame de zinc, on aura des effets composés; pour s'en rendre compte, il faut admettre un instant que, dans le deuxième couple, l'action de la force électro-motrice soit suspendue; dans ce cas, le second zinc possédera la même tension électrique que le second cuivre, le drap mouillé et le premier zinc, tension qui est égale à 1. Rétablissons actuellement l'action électro-motrice. Le deuxième zinc, qui possédait une tension égale à 1, en en recevant une autre égale aussi à 1, par suite de son contact avec le cuivre, en aura donc une en réalité égale à deux. D'un autre côté, la différence entre les tensions du zinc et du cuivre étant égale à 1, suivant la supposition que nous avons faite, l'état électrique du second cuivre sera un. Ainsi donc, dans le cas présent, où deux couples voltaïques sont séparés par une bande de drap mouillé, on aura la distribution suivante :

1er cuivre....................	0
1er zinc......................	+ 1
Drap mouillé..................	+ 1
2me cuivre....................	+ 1
2me zinc......................	+ 2

Posons sur le second zinc une bande de drap mouillé, et sur celle-ci une troisième lame de cuivre; par suite du partage, elles prendront chacune une quantité d'électricité dont la tension sera égale à deux. Plaçons sur

le cuivre une troisième lame zinc; si l'on fait abstraction un instant de l'action électro-motrice, ce dernier zinc aura aussi une tension 2 ; en rétablissant l'action électro-motrice, elle deviendra 3, parce que la différence entre les états électriques du zinc et du cuivre est toujours égale à 1, suivant l'hypothèse fondamentale. La distribution de l'électricité dans une pile formée de trois couples, dont la face cuivre communique avec le sol, est donc :

1er cuivre....................	0
1er zinc......................	+ 1
Drap mouillé..................	+ 1
2me cuivre....................	+ 1
2me zinc......................	+ 2
2me drap mouillé..............	+ 2
3me cuivre....................	+ 2
3me zinc......................	+ 3

En continuant à placer successivement, les uns au-dessus des autres, des bandes de drap et des couples voltaïques, on obtient une distribution de l'électricité d'après laquelle les tensions du zinc forment une progression arithmétique dont la raison est 1.

Si l'on eût monté la pile en faisant communiquer le zinc avec la terre, on aurait eu une distribution de l'électricité analogue, mais en sens inverse.

146. Examinons actuellement la distribution de l'électricité, quand les deux extrémités de la pile auxquelles on a donné le nom de pôles ne communiquent plus avec la terre. Nous prendrons pour guide M. Pouillet, qui a présenté cette distribution dans son traité de physique, d'une manière très-claire.

Nous avons vu, d'une part, que lorsque le cuivre communique avec la terre, la pile ne possède que de l'électricité positive, dont l'intensité va toujours en croissant de haut en bas; de l'autre, que lorsque c'est le zinc, elle

ne possède que de l'électricité négative, dont la tension va également en croissant. Si l'on met en communication ces deux piles par les extrémités qui communiquaient au sol, et en les séparant par une rondelle de drap humide, l'on n'aura plus qu'une seule pile, dans chaque moitié de laquelle la distribution de l'électricité sera la même que dans chacune des piles partielles. L'électricité positive ira donc en croissant suivant une progression arithmétique, depuis la face zinc extrême jusqu'au milieu qui sera l'état zéro, et l'électricité négative suivra la même marche depuis la face cuivre extrême jusqu'au milieu; dans ce cas, la pile prendra à elle-même l'électricité dont elle a besoin pour maintenir son équilibre.

La méthode que nous avons suivie pour trouver la distribution de l'électricité dans une pile voltaïque est purement hypothétique, puisqu'elle repose sur ce principe, que nous avons admis *à priori*, savoir, que l'excès d'électricité que le zinc prend au cuivre est une quantité constante, soit que ces métaux se trouvent ou non à l'état naturel.

Quoique Coulomb ait assuré à M. Biot qu'il avait vérifié cette loi avec sa balance, et qu'elle lui avait paru exacte, néanmoins nous aurions désiré rapporter ici des observations positives à cet égard.

Nous avons supposé les deux extrémités de la pile isolées; mettons maintenant en communication l'une d'elles avec le sol, la distribution de l'électricité changera aussitôt; l'extrémité touchée, ou communiquant avec le sol, sera promptement ramenée à l'état zéro, et il se fera une nouvelle distribution conforme aux principes exposés n° 145.

Si l'on touche un instant un des pôles avec le doigt, le zéro de la pile sera momentanément déplacé, et l'extrémité opposée acquerra une plus forte tension que celle qu'elle possédait avant; mais comme l'air lui enlèvera rapidement l'excès d'électricité acquis, le zéro reviendra au milieu, et l'équilibre sera aussitôt rétabli.

Quand un pôle a été touché, il recouvre presque instantanément l'état électrique qu'il possédait avant : cette expérience peut être faite avec le condensateur ou le plan d'épreuve.

Si l'on met les deux pôles en communication avec un fil de métal, ce fil servira à la recomposition des deux fluides, qui étaient libres avant, à chacune des extrémités, et tous les effets électriques de tension disparaîtront ; mais comme les pertes seront immédiatement réparées, en admettant une conductibilité parfaite dans le système, il en résultera des recompositions continuelles des deux fluides par l'intermédiaire du fil conjonctif.

§ V. *De la force de la pile sous le rapport de la tension.*

147. Trois éléments constituent la force de la pile : la force de production, la force de propagation et la force de tension.

La première dépend de l'énergie avec laquelle l'électricité est dégagée dans chaque élément ; et comme plusieurs causes influent sur ce dégagement, il s'ensuit que cette énergie est continuellement variable. Le cuivre et le zinc sont les métaux qui ont été reconnus pour donner les plus fortes charges, soit que l'on prenne pour liquide interposé une solution de sel marin, ou un mélange d'eau, d'acide sulfurique et d'acide nitrique.

La force de propagation est essentiellement dépendante du liquide conducteur interposé entre les couples ; car moins ce liquide sera bon conducteur et agira chimiquement sur le zinc, plus la pile mettra de temps à se charger, après qu'une première décharge aura eu lieu ; c'est ce qui explique les décharges successives que l'on observe souvent avec des liquides mauvais conducteurs, quand on établit la communication entre les deux pôles. En général, le fil qui sert à établir cette communication ne peut laisser passer, dans un temps déter-

miné, qu'une quantité donnée d'électricité qui dépend de la longueur et du diamètre de ce fil; d'un autre côté, cette quantité ne doit pas être plus grande que celle qui est fournie par la pile dans le même temps. Si elle est moindre, les pôles conservent un peu de tension; dans le cas contraire, il y a entre chaque décharge un intervalle de temps appréciable, dont la durée dépend du temps que met la pile à se recharger.

La quantité d'électricité qui passe dans la pile, dans un temps donné, dépend de plusieurs causes, que nous ferons connaître dans le troisième volume.

L'eau pure est un mauvais conducteur; l'eau salée conduit mieux, mais moins bien que l'eau acidulée par l'acide sulfurique et l'acide nitrique. La pile chargée successivement avec ces trois liquides donne chaque fois des effets particuliers.

Quant à la force de tension pour les mêmes éléments, elle est proportionnelle à leur nombre, et est indépendante de l'étendue des surfaces, comme on peut le voir en montant deux piles avec le même nombre de couples, mais de différentes grandeurs, et touchant leurs extrémités avec le plan d'épreuve; ce plan, porté dans la balance de Coulomb, donne la même tension pour les deux.

148. La pile ayant été chargée avec une solution de sel marin, ou de l'eau acidulée, si une personne mouille ses mains avec le même liquide, qu'elle prenne dans chacune d'elles une tige métallique, et qu'elle touche simultanément avec ces tiges les deux extrémités de la pile, elle reçoit une commotion qui est aussi violente que celle des batteries électriques, et dont la force surtout dépend de la tension, et par conséquent du nombre des couples dont se compose la pile; mais avec cette différence néanmoins que la sensation paraîtra continue, parce que la pile se recharge beaucoup plus vite que les organes ne peuvent la décharger. L'épiderme étant un mauvais conducteur, c'est pour ce motif que l'on humecte les mains avec de l'eau salée ou acidulée. Nous reviendrons sur la com-

motion de la pile, en traitant de ses effets physiologiques.

Arrêtons-nous un instant sur les relations qui existent entre l'énergie de la commotion et la tension de la pile, parce qu'elles peuvent jeter quelque lumière sur la véritable théorie de la pile. Volta a montré le premier que la commotion augmente lorsque l'on monte la pile avec de l'eau salée, sans que les indications de l'électroscope éprouvent un nouvel accroissement. Ayant mis en action un appareil à couronne de tasses, il ajouta successivement, dans chaque vase, une petite quantité de sel; chaque fois l'énergie de la commotion fut augmentée sans que l'effet électroscopique fût changé; la tension électrique resta donc toujours constante. Singer a fait plusieurs expériences à ce sujet, en employant des appareils depuis 100 jusqu'à 1000 couples. Ayant monté une pile de 100 couples avec de l'eau, il observa la tension avec l'électroscope, et eut un choc à peine sensible; en substituant à l'eau de l'acide hydro-chlorique très-étendu, la commotion devint plus forte et la tension diminua sensiblement; enfin, il a constamment trouvé que les effets électriques, c'est-à-dire la tension, étaient d'autant plus forts que l'action chimique était moindre, et qu'en employant de l'eau commune, ces effets étaient les plus forts possible. Il a obtenu encore une augmentation d'effets en combinant une batterie électrique avec une pile ainsi chargée. Ayant mis en communication les deux pôles d'une pile chargée avec de l'eau pure, au moyen de fils métalliques, l'un avec la surface interne, et l'autre avec la surface externe d'une batterie électrique d'environ douze pieds carrés de surface armée, celle-ci se chargea si promptement que l'on pouvait en tirer des étincelles qui se succédaient rapidement (1), tandis qu'en établissant directe-

(1) Éléments d'électricité et de magnétisme, trad. française, p. 364.

ment la communication entre les deux extrémités de la pile, on n'apercevait qu'une très-faible étincelle. Lorsqu'il employait une pile de trois ou quatre cents couples, les étincelles, à l'aide de la batterie, étaient assez fortes pour faire rougir le bout des fils de fer qui servaient de conducteurs. Avec une pile de mille couples, les étincelles étaient accompagnées d'une petite détonation, et avaient assez d'intensité pour produire des phénomènes de combustion. Volta a trouvé, comme nous l'avons dit, que l'action de la pile sur l'électroscope augmentait proportionnellement au nombre des couples. Ritter a cherché si la commotion croissait dans le même rapport; il a trouvé que lorsque l'appareil est chargé avec de l'eau, l'énergie de la commotion augmente avec le nombre des couples, tant qu'ils ne sont pas au-delà de cinq à six cents, mais qu'elle décroît ensuite si l'on en augmente le nombre. Avec de l'eau salée, l'effet croît toujours, à mesure que le nombre des couples devient plus grand.

149. M. Biot a mesuré avec exactitude la tension de l'électricité aux pôles, quand on varie la nature du liquide. Il a commencé par disposer un appareil qui permettait de rendre les communications aussi parfaites que possible entre les plateaux du condensateur et les pôles, attendu que le moindre obstacle suffit pour ralentir considérablement la propagation de l'électricité. Le mode de communication qu'il a adopté remplit toutes les conditions voulues(1). La figure 61 indique le dispositif de l'appareil. On pose sur le sommet de la pile un petit vase de fer, rempli de mercure, et dont toutes les parties sont bien nettoyées. La communication entre le condensateur et le sommet de la pile est établie au moyen d'une tige en fer, dont l'un des bouts plonge dans le mercure, et l'autre est fixé sur le plateau supé-

(1) Précis élémentaire physique et expérimental, t. 1er, 2e éd., p. 633.

rieur du condensateur; enfin, il a fait usage du plan d'épreuve et de la balance de Coulomb, comme à l'ordinaire.

M. Biot a d'abord cherché les charges que donnent des piles d'un même nombre de couples, montées avec des conducteurs humides de diverses natures, et dont l'un des pôles communique avec le sol; il a trouvé que l'eau et les acides affaiblis, ainsi que la plupart des dissolutions salines, donnent sensiblement les mêmes quantités d'électricité libre par un contact presque instantané, et que l'on peut accroître ou diminuer beaucoup l'étendue de leur surface sans changer sensiblement leur charge. Il a trouvé néanmoins des liquides qui donnaient des charges inégales.

Quand la pile est isolée, les signes électroscopiques aux deux pôles sont très-faibles, et les condensateurs même les plus forts ne s'y chargent pas sensiblement.

Nous ne pouvons en dire davantage dans ce moment sur les relations qui existent entre le nombre des éléments d'une pile, la nature du liquide interposé, la tension et la force de la commotion; nous y reviendrons plus tard, quand nous posséderons les documents nécessaires pour traiter à fond cette question.

§ VI. *De l'électricité de tension de la pile considérée sous le rapport électro-chimique.*

150. Si l'hypothèse d'où Volta est parti pour expliquer les phénomènes de la pile était exacte, le problème de la distribution de l'électricité serait facile à résoudre (1); mais cette hypothèse, qui a déja perdu beaucoup de sa valeur dans l'état actuel de la science, ne saurait être admise, à l'exclusion du principe électro-chimique, c'est-à-dire de l'électricité qui se dégage dans l'action chimique en général. L'existence de ce principe est tellement bien

(1) § III de ce Chapitre.

constatée aujourd'hui, que l'on ne peut élever le moindre doute sur son exactitude, il est donc nécessaire de le prendre en considération dans la théorie de la pile.

On savait depuis long-temps qu'une pile, chargée avec une dissolution saline, ne fonctionne pas dans un milieu privé d'oxigène (1). Cette observation indiquait déja que l'action chimique était une des causes déterminantes du dégagement de l'électricité dans la pile.

Peu de temps après, Aldini consignait, dans son Essai sur le galvanisme (2), le passage suivant, en comparant les phénomènes électriques à ceux du galvanisme : « Il semble que les uns dépendent, en général, de l'action de causes purement physiques, tandis que, pour exciter les autres, il a fallu jusqu'à présent employer le pouvoir des agents chimiques. En effet, comme par de petites variations faites à la surface du corps, ou par la différente manière dont ils sont excités au moyen de forces purement mécaniques, l'on change le genre d'électricité qui leur est propre; ainsi, par une altération chimique, on change aisément les pôles du galvanisme. » Il rapporte ensuite avoir vu chez Davy ce changement opéré au moyen d'une dissolution de sulfure de potasse versée dans un appareil composé de cuivre et de fer. Le cuivre étant plus attaqué que le fer, devenait l'élément positif.

Il est donc prouvé par là que, peu de temps après la découverte de la pile, on avait observé que l'action chimique du liquide sur chaque métal modifie tellement les effets de tension, que l'on pouvait renverser les pôles à volonté, en changeant convenablement le liquide. On attribuait alors cette inversion des pôles à l'action électro-motrice exercée par le zinc ou le cuivre sur le produit formé qui adhérait à l'une des deux surfaces; mais comme on obtenait le même résultat quand la combinaison se dissolvait aussitôt qu'elle était formée, on

(1) Vol. Ier.
(2) Vol. Ier, p. 77.

aurait dû reconnaître, dans le phénomène, une cause électro-chimique.

Cette question a été traitée au commencement de ce volume avec le multiplicateur, c'est-à-dire en ne considérant que les courants électriques. Maintenant nous allons l'examiner, en n'ayant égard qu'aux effets de tension.

Nous savons qu'à l'instant où un corps réagit chimiquement sur un autre, l'un jouant le rôle d'acide, et l'autre celui d'alcali, le premier dégage de l'électricité positive, et le second de l'électricité négative; ces deux électricités se recombinent immédiatement pour former du fluide neutre, en suivant tous les corps conducteurs qui se présentent à elles : ce phénomène se produit quel que soit l'état des corps, solide, liquide ou gazeux; car il est bien prouvé maintenant que, lorsqu'un couple voltaïque, zinc et cuivre, se trouve dans un milieu gazeux capable d'attaquer le zinc plus que le cuivre, le premier se recouvre d'un excès d'électricité positive plus considérable que si le gaz n'existait pas. Bien que ce fait, et plusieurs autres que j'ai rapportés, soient contraires à la théorie de Volta, je crois néanmoins que les faits ne sont pas encore assez décisifs pour l'abandonner tout-à-fait, surtout si l'on admet que la tendance à la combinaison qui commence au contact est une cause de trouble dans l'équilibre des forces électriques; j'avoue néanmoins que cette théorie est fortement ébranlée. Quoi qu'il en soit, reconnaissons avant tout qu'il s'opère, par le seul fait de l'action chimique, des décompositions et recompositions des deux fluides. Cela posé, examinons les effets électriques de tension dans les réactions chimiques.

151. Quand un acide réagit sur une lame de métal ou une base, les deux électricités dégagées se recombinent dans la dissolution; mais si l'acide et le métal communiquent ensemble au moyen du fil d'un multiplicateur, une partie des deux électricités suit ce fil. Il n'en est pas toujours ainsi quand on se sert du condensateur pour recueillir les mêmes électricités, attendu qu'elles trouvent souvent plus de facilité, surtout lorsque l'action

chimique est très-vive, à former du fluide neutre sur la surface de contact des deux corps en action, que l'une de s'écouler dans le sol, et l'autre de se porter sur l'un des plateaux du condensateur pour dissimuler un excès d'électricité contraire sur l'autre plateau. On a donc un avantage immense à se servir du multiplicateur pour observer les effets électro-chimiques; néanmoins il est bon aussi de constater les effets de tension. Voici les expériences qui ont été faites à ce sujet : sur le plateau supérieur d'un excellent condensateur en or ou en cuivre doré, on pose un vase d'or ou de platine, dans lequel on verse de l'acide nitrique concentré, puis l'on plonge dedans le bout d'une lame de cuivre que l'on tient par l'autre bout. En touchant avec le doigt le plateau inférieur, on ne parvient que très-difficilement à obtenir une très-faible charge; mais il n'en est plus de même quand on étend l'acide de plusieurs fois son poids d'eau. On trouve alors que l'acide donne de l'électricité positive, et le métal de l'électricité négative, conformément au principe général. Ainsi donc, quand il y a action chimique violente, on ne peut avoir avec le condensateur des effets de tension bien manifestes; tandis qu'on les obtient facilement lorsqu'elle est faible. Dans le premier cas, le liquide étant meilleur conducteur et l'action chimique plus forte, la recomposition s'effectue mieux sur la surface de contact que dans l'autre. Voilà la cause du phénomène, comme M. Delarive l'a parfaitement expliqué. Les expériences suivantes viennent à l'appui de ce que nous venons d'avancer.

On pose sur le plateau supérieur du condensateur une capsule de bois dans laquelle on met de l'eau distillée, et dont les bords sont légèrement humides pour qu'elle soit conductrice. On plonge ensuite dedans des lames de différents métaux, que l'on tient par un des bouts avec les doigts lavés dans la même eau. Il n'y a aucun effet de produit, attendu que les lames étant attaquées des deux bouts, les effets se détruisent; mais pour peu que l'eau de la capsule renferme un sel ou un acide capable de réagir sur le métal, alors on recueille

de l'électricité dont l'espèce dépend de la nature de l'action chimique. Le zinc, le fer, le plomb, l'étain, le cuivre, prennent à l'eau l'électricité négative, et lui donnent l'électricité positive; résultat qui est encore conforme au principe général. Le platine et l'or ne donnent aucune électricité, excepté dans le cas où ils ont été mouillés avec de l'eau distillée; car on a alors l'effet produit par la réaction des liquides.

Une lame d'or qui a été plongée dans l'acide nitrique et lavée ensuite dans l'eau distillée, soumise à l'expérience dans la capsule de bois, prend l'électricité positive, par suite de la réaction sur l'eau de l'acide qui n'a pu être enlevé entièrement. Si on l'eût plongée préalablement dans une solution de potasse pour enlever l'acide, puis lavée, il n'y aurait eu aucun effet. Une lame de platine donne le même résultat, qui est dû, à n'en pas douter, à la réaction de l'eau sur l'acide nitrique retenu à la surface du métal par l'action capillaire, et qui n'a pas été enlevé par l'eau. Substituons à la capsule de bois des capsules de différents métaux, pour avoir des différences dans les effets électriques, lesquelles sont toujours en faveur du métal le plus attaqué.

CAPSULE en métal.	LIQUIDE contenu dans la capsule.	MÉTAL plongé dans le liquide.	ÉTAT électrique de la capsule.
Platine..........	Acide sulfurique concentré..........	.... Or..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Argent..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Cuivre..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Fer..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Plomb..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Zinc..........	...... +
Platine..........	Acide sulfurique très-étendu d'eau....	.... Or..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Argent..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Cuivre..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Fer..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Plomb..........	...... +
idem..........	...... *idem.*	.... Zinc..........	...... +

CAPSULE en métal.	LIQUIDE contenu dans la capsule.	MÉTAL plongé dans le liquide.	ÉTAT électrique de la capsule.
Cuivre.........	Acide sulfurique concentre...........	.... Or..........	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Argent........	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Platine.......	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Fer..........	 0
idem.........	...... *idem*.	.... Plomb........	 0
idem.........	...... *idem*.	.... Zinc..........	...... —
Cuivre.........	Acide sulfurique étendu d'eau.........	.... Or..........	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Argent.	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Platine.	...... —
idem	...... *idem*.	.... Fer..	...... +
idem.........	...... *idem*.	.... Plomb........	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Zinc.	...... +
Platine.........	Dissolution de potasse...........	.... Or..........	...... +
idem.........	...... *idem*.	.... Argent..	...... +
idem........	...... *idem*.	.... Cuivre.	...... +
idem.........	...... *idem*.	.... Fer..........	...... +
idem.........	...... *idem*.	.... Plomb........	...... +
idem.........	...... *idem*.	.... Zinc..........	...... +
Cuivre.........	Dissolution de potasse..........	.... Or..........	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Argent........	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Platine.......	...... —
idem.........	...... *idem*.	.... Fer..........	...... +
idem.........	...... *idem*.	.... Plomb........	 0
idem.........	...... *idem*.	.... Zinc..........	...... +

Si nous jetons les yeux sur ces deux tableaux, nous reconnaissons que tous ces résultats peuvent avoir une origine chimique, abstraction faite de l'action de contact.

1° En opérant avec la capsule de platine, dont le métal n'a pas été attaqué par l'acide, la capsule a dû prendre constamment l'électricité positive que l'acide a dégagée dans sa réaction sur les autres métaux.

2° Avec la capsule de cuivre et l'acide sulfurique concentré, les résultats ont dû être différents, attendu que

l'or, l'argent et le platine ne sont pas attaqués à froid par cet acide, tandis que le cuivre l'est. Si le fer et le plomb ont donné des résultats nuls, c'est une preuve que les effets électriques étaient les mêmes de part et d'autre.

3° Avec la capsule de platine et la dissolution de potasse, la première a dû prendre l'électricité positive, parce que le platine étant attaqué par la potasse, joue dans ce cas le rôle d'acide.

On voit donc qu'on peut rendre compte parfaitement de tous ces résultats à l'aide des effets électro-chimiques sans faire intervenir l'action du contact; aussi en concluons-nous qu'il est impossible de négliger ces effets dans la théorie de la pile, et qu'il faut les mettre en première ligne.

Nous avons donné, § III de ce chapitre, la distribution de l'électricité dans la pile, en nous appuyant sur la force électro-motrice développée au contact; nous allons maintenant la présenter n'ayant égard qu'à l'action chimique, et en négligeant diverses causes perturbatrices dont nous ne prendrons connaissance qu'après avoir étudié les variations qu'éprouvent les courants électriques produits dans un fil de métal qui joint les deux pôles d'une pile. Il n'est donc question ici que des effets de tension. En conséquence, nous suivrons la marche que nous avons adoptée plus haut.

152. Soit un couple zinc cuivre dont la face cuivre communique avec le sol; posons sur la face zinc une rondelle de drap humide. Le zinc étant attaqué, l'électricité négative sera chassée dans le cuivre comme par une force de projection, puis dans le sol. L'électricité positive suivra une direction opposée et se répandra sur la surface du zinc et sur la rondelle; si l'action chimique cessait, cette dernière électricité s'écoulerait aussi dans le sol; mais comme elle n'est pas discontinue, la rondelle et la surface du zinc se trouvent toujours dans un état positif. Jusqu'ici l'effet est le même que s'il se produisait des actions électro-motrices au

contact des deux métaux. Plaçons maintenant sur la rondelle, par la face cuivre, un nouveau couple, et au-dessus une seconde rondelle; si celle-ci n'existait pas, l'air humide produirait le même effet sur le zinc. L'électricité négative qui est chassée du second zinc par le fait de l'action chimique, neutralise l'électricité positive adhérente à la surface du premier zinc, et à celle de la première rondelle; quant au deuxième zinc, sa tension se trouve doublée par suite de l'électricité qui lui est propre et de celle qu'il reçoit du premier zinc. Nous supposons que le premier et le second zinc sont attaqués au même degré, et que les deux cuivres ne le sont pas du tout. Si l'on pose sur la troisième rondelle un troisième couple, en suivant le même raisonnement, on aura une distribution à la précédente.

Comparons la distribution de l'électricité dans la même pile, en ayant égard, dans l'une, à la force électro-motrice, et dans l'autre, à l'action chimique seulement. Mais avant présentons quelques observations sur le mode d'action de l'électricité dans l'un et l'autre cas.

Volta supposait, avons-nous dit, que lorsque deux corps conducteurs sont en contact, ils se constituent l'un et l'autre dans un état électrique différent; ainsi donc, les deux fluides, malgré l'action attractive qu'ils exercent l'un sur l'autre, se trouvent en équilibre sur la surface même de contact, sans pouvoir la franchir, pour former du fluide neutre. L'expérience nous a montré que, dans la réaction de deux corps l'un sur l'autre, chacun d'eux se constitue également dans un état électrique contraire, mais avec cette différence, que les deux fluides ne restent pas en équilibre à la surface de contact, aussitôt que l'action qui les a produits a cessé; ils sont libres ensuite de se recombiner sur la surface même de contact, et en suivant tous les conducteurs qui se présentent à eux. Il n'existe donc pas, à proprement parler, d'équilibre électrique sur cette surface, mais bien des décompositions et recompositions

des deux fluides électriques qui ne cessent que lorsqu'il n'y a plus d'action chimique. Cette explication est purement et simplement l'expression des faits.

On peut se demander, à la vérité, pourquoi le fluide positif est-il projeté d'un côté, et le fluide négatif de l'autre, avec une force telle, que la recomposition ne s'opère pas immédiatement sur la surface même de contact ; il faut donc qu'il y ait sur cette surface une cause qui les éloigne pendant un instant très-court : nul doute que cela ne soit ainsi ; mais nous touchons à une question que nous ne pouvons traiter ici, c'est celle qui est relative à la nature électrique des atomes ; ainsi, arrêtons-nous.

	Distribution de l'électricité dans une pile formée de quatre éléments, dont l'un communique au sol par la face cuivre.	Distribution de l'électricité dans une pile formée de quatre éléments, dont l'un communique au sol par la face cuivre.
	Théorie du contact.	Théorie électro-chimique.
1er cuivre	0	0
1er zinc	+ 1	0
Drap mouillé.		
2me cuivre	+ 1	0
2me zinc	+ 2	0
Drap mouillé.		
3me cuivre	+ 2	0
3me zinc	+ 3	+ 2
Drap mouillé.		
4me cuivre	+ 3	+ 2
4me zinc	+ 4	+ 4

Dans l'une et l'autre théorie, la tension du zinc extrême est la même ; mais il y a ensuite une grande différence dans celles des autres disques.

En faisant communiquer la face zinc avec le sol, on a le même arrangement, au signe près.

Si l'on isole les deux pôles, on a les résultats suivants :

	Théorie du contact.	Théorie électro-chimique.
1er cuivre	—2	—4
1er zinc	—1	—2
Drap mouillé.		
2me cuivre	—1	—2
2me zinc	0	0
Drap mouillé.		
3me cuivre	0	0
3me zinc	+1	+2
Drap mouillé.		
4me cuivre	+1	+2
4me zinc	+2	+4

Ici les tensions ne sont plus les mêmes; car celles qui sont données par la théorie électro-chimique sont précisément doubles des tensions que la théorie du contact assigne à chaque disque; de plus, les premières sont les mêmes sur la face zinc, que la pile communique ou non avec le sol par la face cuivre; or, l'expérience montre le contraire, puisque l'on a reconnu que la tension est plus forte quand l'un des pôles communique avec la terre que lorsque la pile est isolée. Comment accorder la théorie avec l'expérience? Rien n'est plus facile, si l'on tient compte des recompositions qui ont lieu, à chaque instant, dès que l'action chimique a cessé.

Dans le premier cas, lorsque la face cuivre communique au sol, la partie supérieure de la pile ne possède que l'électricité positive; par conséquent l'électroscope doit accuser la tension relative à cette partie. Dans le second cas, il n'en est plus de même, attendu que l'électroscope reçoit indistinctement, et l'électricité positive de la partie supérieure, et l'électricité négative de la partie inférieure, laquelle neutralise la première si la conductibilité électrique est suffisante. La tension devrait donc être nulle, si les liquides intermédiaires étaient

de bons conducteurs; si elle ne l'est pas, c'est une preuve, ou que les deux fluides ne se recombinent pas en entier, immédiatement, à cause de la mauvaise conductibilité des liquides, ou qu'une cause autre que l'action chimique concourt à la distribution de l'électricité. Or, l'expérience prouve que les signes électroscopiques aux deux pôles de la pile isolée sont très-faibles, et que les condensateurs même les plus forts ne s'y chargent pas sensiblement (1). Il semble donc, d'après cela, que l'on doive accorder dans cette circonstance la préférence à la théorie électro-chimique sur celle du contact.

Il faut en appeler maintenant à l'expérience pour déterminer au juste la tension électrique de chaque élément dans la pile, quand l'un de ses pôles communique avec le réservoir commun. Jusqu'ici on n'a fait aucune expérience positive dont les résultats aient été publiés; tout ce que nous en savons à cet égard, c'est que M. Biot a ouï dire à Coulomb qu'il avait vérifié la loi de l'équidifférence électrique entre les disques, et qu'elle lui avait paru exacte; au surplus, nous reviendrons sur cette question en traitant des phénomènes électro-dynamiques. La théorie électro-chimique de la pile que nous venons de décrire est tout-à-fait hypothétique.

§ VII. *Des piles sèches.*

153. On a appelé improprement *piles sèches*, celles dans lesquelles le liquide conducteur est remplacé par un corps solide légèrement humide. La présence de l'humidité est indispensable; car il n'existe jusqu'ici aucune pile composée de substances solides et complétement sèches.

Plusieurs tentatives ont été faites pour former des piles sèches (2). Celles de M. Zamboni ont donné les

---

(1) Biot. Précis de physique expérimentale, 2e éd. p. 635.
(2) Vol. Ier, p. 165.

résultats les plus satisfaisants. Ce physicien prend des feuilles de papier ordinaire un peu fort et humide, ou bien imbibé de lait, de miel, ou d'une matière organique analogue, et colle sur une face, avec de l'amidon ou de la gomme, une feuille très-mince de zinc ou d'étain laminé; sur l'autre face, il applique, avec un bouchon, du peroxide de manganèse très-divisé. Telle est la composition de l'élément voltaïque de la pile sèche. Cela fait, il superpose, dans le même ordre, un certain nombre de ces feuilles, et il enlève chaque fois, avec un emporte-pièce de 10 à 15 lignes de diamètre, un certain nombre de disques qui lui servent ensuite à former des piles. Ayant superposé ainsi plusieurs milliers de ces disques, il les tient serrés sous une presse, et enveloppe toute la colonne d'une couche de gomme laque de plusieurs lignes d'épaisseur, pour empêcher que l'humidité ne se dissipe dans l'air. Depuis, on a reconnu qu'il valait mieux ne pas mettre d'enveloppe, et maintenir les disques serrés les uns contre les autres avec deux fils en croix dirigés dans la longueur de la couche. Sur la face zinc, on mastique une plaque plus épaisse de même métal, sur laquelle on visse une boule qui forme le pôle positif de la pile; de l'autre côté, on ajuste de la même manière une boule de cuivre.

La théorie de cette pile est assez compliquée, attendu que la matière organique réagit, non-seulement sur le zinc, mais encore sur le peroxide de manganèse qu'elle ramène à un degré moindre d'oxidation.

En effet, M. Zamboni, qui a examiné l'état électrique de ses piles, selon qu'elles sont formées avec des disques de papier étamé seulement d'un côté, sans aucune substance interposée, ou bien avec des disques d'étain recouverts d'oxide de manganèse, a trouvé des résultats dans le même sens, ou, en sens contraire, en imbibant de diverses substances le papier collé à l'étain. Si l'on se sert d'huile, l'action est opposée à celle que produit l'oxide de manganèse. Lorsqu'on introduit au contraire,

dans le papier, du miel, un alcali, une dissolution de sulfate de zinc, ou du lait à demi-caillé, la pile agit comme celle dans laquelle les éléments sont saupoudrés d'oxide de manganèse.

Une pile à la Zamboni, composée de deux mille couples, ne donne pas la moindre commotion, parce que la circulation du fluide électrique ne s'y fait pas assez vite pour qu'elle puisse fournir, dans un temps donné, la quantité d'électricité qui est nécessaire pour la produire. La tension électrique de chaque pôle peut être rendue sensible avec le plan d'épreuve. Si l'on met en contact un de ses pôles, pendant quelques instants, avec un condensateur de taffetas gommé, on obtient des étincelles qui ont quelquefois un pouce de long. Elle peut servir à charger des batteries.

M. Zamboni pense qu'une pile de cinquante mille paires de plaques auxquelles on laisserait le diamètre ordinaire des feuilles de papier étamé, serait une source constante d'électricité, dont la tension égalerait celle d'une forte machine électrique ordinaire.

L'air humide tend sans cesse à décharger cette pile; aussi la tension de ses pôles varie-t-elle suivant son état hygrométrique. La tension n'acquiert une valeur fixe que, lorsque ayant été affaiblie par les pertes, l'air humide lui enlève de l'électricité autant que la pile lui en rend dans le même temps.

Ces piles ne fonctionnent pas indéfiniment; leur énergie se perd en général à mesure qu'elles se dessèchent. Zamboni, qui s'est beaucoup occupé de leur mode d'action, a reconnu que la diminution de la tension cesse au bout de deux ans, et varie, dans cet intervalle, suivant la manière dont la pile a été formée; que l'énergie est plus grande en été qu'en hiver, tant sous le rapport de la tension que sous celui de la promptitude avec laquelle elle se manifeste.

154. M. Donné n'a remarqué aucun rapport entre les variations de tension et les hauteurs barométriques. Il a

reconnu qu'une pile à la Zamboni, placée dans le vide, et dont l'un des pôles communique avec la terre, et l'autre avec un électroscope, possède la même tension que dans l'air. Cet effet tient très-probablement à ce que la charge de la pile s'effectue plus rapidement que la déperdition dans le vide.

La température lui a paru agir d'une manière très-variée, et par conséquent très-compliquée. La tension de la pile est presque toujours en rapport avec la température de l'atmosphère; ce qui confirme les observations précédentes de Zamboni, savoir, que la pile a plus d'énergie en été qu'en hiver. L'augmentation de tension n'a pas lieu aussitôt que la température extérieure s'élève, il faut attendre quelque temps pour que son action pénètre dans l'intérieur de la colonne. Il paraît que la chaleur, outre son influence sur les actions chimiques, agit mécaniquement sur les éléments, par la dilatation et la contraction, pour modifier la tension de l'électricité.

Lors de l'invention des piles sèches, on imagina un appareil à l'aide duquel on crut pouvoir reconnaître d'avance certains phénomènes météorologiques; mais on fut bientôt désabusé quand on eut étudié son mode d'action. Voici cet appareil : prenons deux piles de 2000 couples chacune, et plaçons-les verticalement sur une bande de métal, à peu de distance l'une de l'autre, les pôles inverses en regard : cet assemblage constitue une pile de 4000 éléments. Suspendons maintenant, entre les deux pôles supérieurs, une aiguille de métal très-légère, très-mobile et isolée; elle sera d'abord attirée par un des pôles, puis repoussée quand elle aura pris une portion de son électricité, et attirée ensuite par l'autre pôle qui possède une électricité contraire, et ainsi de suite. Il résulte de ces attractions et répulsions non interrompues, une espèce de mouvement perpétuel, dont on a voulu se servir, mais inutilement, pour diverses applications. Si l'état de l'air était constant,

que la pile n'éprouvât pas de variations dans sa charge, on aurait pu obtenir des oscillations isochrones; mais comme ces conditions ne peuvent être remplies, il n'en résulte qu'un mouvement irrégulier. Aussi cet appareil marche-t-il tantôt vite, tantôt lentement, et s'arrête-t-il même par intervalles, pour reprendre ensuite sa marche.

155. M. Watkins (1) est parvenu à construire, avec un seul métal (zinc) et sans liquide, une pile qui possède une tension remarquable; elle est composée de 60 à 80 plaques de zinc, de 4 pouces de surface, décapées et polies sur une de leurs surfaces et non sur l'autre, fixées dans une auge de bois, parallèlement entre elles et à une très-petite distance les unes des autres (1 ou 2 mm.), de manière qu'elles ne sont séparées que par une couche d'air très-mince. Les faces polies sont toutes tournées du même côté, et les deux plaques extrêmes aboutissent chacune à un conducteur. Si l'on fait communiquer l'une des extrémités de la pile avec le sol, et l'autre avec un électroscope, celui-ci se charge aussitôt de l'une ou de l'autre électricité, suivant celui des deux pôles avec lequel il est en contact. L'humidité de l'air favorise l'action de cette pile, qu'on peut regarder comme une espèce de pile sèche dans laquelle le papier est remplacé par une couche d'air humide; les deux surfaces du zinc font l'office de deux métaux hétérogènes. Il paraît donc que c'est à l'action oxidante de l'air, plus forte sur la surface polie et décapée que sur l'autre, qu'est dû le développement de l'électricité sur chaque lame de zinc; et que la couche d'air très-mince, qui sépare les plaques les unes des autres, et peut-être les parois de l'auge de bois dans lesquelles ces plaques sont placées, permettent à chacun des principes électriques de s'accumuler séparément, comme dans une pile ordinaire, aux deux pôles de l'appareil. Nous

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. xxx, p. 442.

avons exposé dans ce livre les propriétés générales relatives aux deux fluides électriques, lorsqu'ils se trouvent en équilibre à la surface des corps, ainsi que les principaux appareils qui servent à étudier ces propriétés; nous allons maintenant présenter les phénomènes magnétiques, dont la connaissance est nécessaire pour se former une idée nette des phénomènes qui ont lieu quand l'électricité est en mouvement.



DU MAGNÉTISME.

LIVRE II.

CHAPITRE PREMIER.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES AIMANTS.

Des attractions et répulsions magnétiques, et des pôles magnétiques.

156. Jusqu'ici nous nous sommes occupés des propriétés attractives et répulsives qu'acquièrent passagèrement les molécules des corps, quand elles sont dérangées de leur position naturelle d'équilibre par la chaleur, le frottement, la pression, l'action chimique et d'autres causes; nous allons exposer actuellement d'autres propriétés également attractives et répulsives, mais qui sont particulières à certains corps et différentes des précédentes, quoique ayant des rapports communs et pouvant dépendre du même principe.

Toutes ces propriétés sont de la plus haute importance pour la philosophie naturelle, en ce qu'elles peuvent servir à jeter quelque jour sur la nature des atomes et celle de la matière éthérée qui les entoure; aussi doivent-elles faire l'objet des recherches spéciales de quiconque veut lier ensemble la physique et la chimie.

Un morceau de fer qui reste exposé, pendant un certain temps, aux influences atmosphériques, ou qui séjourne long-temps dans la terre, acquiert peu à peu la

propriété d'attirer la limaille de fer, et même de soulever des morceaux assez pesants de ce métal : certains minerais de fer la possèdent également. On appelle ces corps *aimants*, et l'ensemble de leurs propriétés *magnétique*, dérivé de μαγνης, nom sous lequel les anciens connaissaient les minerais de fer doués du pouvoir attractif.

Voici le moyen le plus simple d'étudier les effets de cette attraction :

Lorsque l'on roule dans de la limaille de fer un barreau de fer aimanté, qui a la forme d'un rectangle allongé, et qu'on le retire ensuite, on voit que les parcelles de limaille s'attachent à sa surface, mais non également sur toutes les parties ; c'est surtout à peu de distance des extrémités que l'effet est le plus sensible (fig. 62). La figure 61 bis indique la distribution des limailles sur un aimant naturel.

On remarque aux extrémités du barreau des filaments très-longs, qui sont dressés perpendiculairement à sa surface; en s'éloignant de ces points, ils deviennent plus courts et s'inclinent comme s'ils fuyaient les extrémités; enfin, dans la partie moyenne, il ne se dépose aucun filament. On peut encore étudier l'action que tous les points du barreau aimanté exercent sur le fer, en plaçant au-dessus une feuille de papier sur laquelle on projette de la limaille; si l'on frappe légèrement la feuille de papier, les parcelles de limaille se distribuent comme ci-dessus. Dans les deux cas, on reconnaît qu'elles se portent plus rapidement dans certaines régions, près des extrémités, que dans d'autres. On a appelé *pôles*, les régions de l'aimant où l'attraction est la plus forte ; mais on réserve particulièrement ce nom aux deux points par lesquels passent les résultantes des forces qui sont mises en action. Nous donnerons plus loin les moyens de déterminer leur position avec toute la précision désirable.

Un barreau aimanté, attirant à lui, par chacune de ses extrémités, les parcelles de fer qu'on lui présente, agira de la même manière sur une aiguille de fer doux, librement suspendue à un fil de soie qui a assez de

flexibilité pour lui permettre de se mouvoir dans un plan horizontal. Ce phénomène a encore lieu quand on interpose, entre le barreau et la limaille ou l'aiguille, des corps tels que le bois, le papier, le verre, etc. Tous les corps n'arrêtent donc pas la puissance attractive qui émane des aimants. Si l'on remplace l'aiguille de fer doux par une aiguille aimantée, on trouve que chacun de ses pôles est attiré par l'une des extrémités du barreau et repoussé par l'autre. Concluons de là que les deux moitiés d'un barreau ou d'une aiguille aimantée ne possèdent pas la même faculté magnétique.

157. Nous avons vu que les parcelles de limaille qui se groupent autour des parties extrêmes d'un aimant, se tiennent unies les unes aux autres et forment des filaments plus ou moins longs, suivant leur distance des pôles. Ce phénomène indique donc cette propriété remarquable du fer doux, de devenir lui-même un aimant capable d'agir comme tel, sur les parcelles de fer qui l'environnent, lorsqu'il est mis en contact avec un aimant. Pour mettre plus en évidence cette propriété, il suffit de placer verticalement un barreau de fer, par l'un de ses bouts, très-près de l'une des extrémités d'un barreau aimanté horizontal, et de présenter au bout libre du premier de la limaille de fer ; celle-ci s'y attache aussitôt, et y reste suspendue tant que l'action par influence subsiste; mais aussitôt qu'elle cesse, lorsqu'on enlève l'aimant, la limaille retombe. Au lieu de limaille, on peut expérimenter avec de petits cylindres de fer doux, que l'on fait adhérer les uns aux autres au moyen de l'action par influence. Vient-on à retirer l'aimant, les cylindres restent sans action les uns sur les autres, et retombent aussitôt.

Pendant l'aimantation par influence, l'aimant ne perd rien de son magnétisme, et le fluide magnétique ne passe même pas d'une molécule à une autre, comme dans le dégagement de l'électricité par influence; car il est facile de démontrer qu'un barreau aimanté ne perd rien de son pouvoir attractif, quel que soit le nombre des barreaux de fer qu'il ait servi à aimanter. D'un

autre côté, le fer doux rentrant dans l'état naturel, dès l'instant qu'il n'est plus sous l'influence de l'aimant, doit posséder en lui-même les deux principes propres à lui faire acquérir la propriété magnétique; ainsi il ne doit rien prendre à l'aimant. Pour montrer que le magnétisme ne passe pas d'une molécule à une autre afin de s'accumuler aux extrémités, il suffit de mettre un fil de fer en contact avec un aimant, et de couper l'extrémité libre du fil de fer; la partie coupée ne possède aucune trace de magnétisme libre. Le phénomène est donc simplement moléculaire.

Un aimant non-seulement ne perd rien de sa force par l'aimantation qu'il produit dans des barreaux de fer, mais son énergie doit successivement augmenter; en effet, quand le pôle *a* d'un aimant touche l'extrémité *b* d'un barreau, il y développe un magnétisme de nom contraire, celui-ci réagit par influence sur le magnétisme naturel de l'aimant, de manière à y exciter une nouvelle décomposition, qui augmente nécesssairement son magnétisme libre. Cet accroissement de magnétisme réagit à son tour sur le magnétisme naturel du barreau, et ainsi de suite; de sorte que par ces décompositions successives, le magnétisme libre de l'aimant et du barreau augmente jusqu'à une certaine limite.

En raison de ces propriétés, on attribue les phénomènes magnétiques à l'action de deux fluides doués de propriétés contraires, qui résident autour des molécules du fer, sans pouvoir passer d'une molécule à une autre, et dont la réunion forme le fluide magnétique naturel. De même que dans la théorie de l'électricité, on admet deux fluides différents, qui se neutralisent l'un l'autre pour former du fluide électrique naturel, de même aussi on pense que le fluide magnétique naturel se compose de deux fluides dont les molécules de chacun d'eux se repoussent, tandis qu'elles attirent celles de l'autre fluide. Aussi avons-nous vu que dans deux aiguilles aimantées, librement suspendues, les pôles de même nature se repoussent, et ceux de nature différente s'attirent.

M. Ampère envisage les attractions et répulsions magnétiques sous un autre point de vue; il les fait dépendre de l'action de courants électriques qu'il suppose exciter autour des molécules des aimants dans une direction déterminée. Nous nous occuperons plus tard de cette question, qui est fondamentale pour la théorie de l'électricité et du magnétisme.

158. Les deux moitiés d'un barreau aimanté possèdent ordinairement chacune un magnétisme contraire; mais il arrive quelquefois qu'il y a de chaque côté des alternatives de magnétisme contraire, et par suite plus de deux pôles. Les pôles intermédiaires sont appelés *points conséquents*.

Pour les découvrir, on présente successivement le même pôle d'une aiguille aimantée, librement suspendue, à tous les points du barreau, maintenu constamment dans une position verticale; chaque fois que l'on passe d'une attraction à une répulsion, on est assuré qu'il se trouve un point conséquent là où l'action est nulle. On peut encore déterminer ces points en plaçant sur le barreau une feuille de papier et projetant dessus de la limaille; le groupement des parcelles en certains points indique sur-le-champ la position des points conséquents (fig. 63).

Un barreau de fer doux, qui est aimanté par influence, rentre dans l'état naturel dès l'instant que l'on retire l'aimant; mais il n'en est plus de même avec des barreaux de fer écroui ou d'acier trempé: dans ce cas, l'action par influence est plus lente à se manifester; mais aussi, une fois qu'elle est développée, elle y persévère pendant long-temps, même lorsque les barreaux ne sont plus sous l'influence de l'aimant. On dit dans ce cas que le barreau est aimanté. C'est alors un aimant artificiel; il existe donc dans le fer écroui et dans l'acier une cause quelconque qui s'oppose à la décomposition du magnétisme naturel, et à la recomposition des deux fluides, quand ils sont séparés, laquelle a de l'analogie avec celle qui s'oppose également à la dé-

composition de l'électricité par influence dans les corps mauvais conducteurs. On attribue cette cause à l'action d'une force coercitive, qui résulte, soit de l'arrangement des molécules, soit de l'interposition entre elles de molécules étrangères.

Cette force varie, dans les différents aciers, suivant la trempe : plus la trempe est roide, plus la force coercitive est grande. Les propriétés magnétiques sont soumises naturellement aux mêmes variations.

159. L'aimantation est très-lente à s'opérer dans un barreau d'acier trempé par l'influence seule d'un aimant, comme on peut le voir en répétant l'expérience des petits cylindres de fer doux avec d'autres cylindres d'acier trempé ; mais elle a lieu presque instantanément, si l'on passe avec frottement, toujours dans le même sens, sur toute la longueur d'un barreau, l'un des pôles d'un aimant ; quelques frictions suffisent pour produire l'aimantation. Une aiguille d'acier trempé brisée en deux présente cette singulière propriété, que les deux portions séparées sont elles-mêmes deux aimants, dans lesquels les parties séparées possèdent un magnétisme contraire.

Le fer doux acquiert la propriété polaire, quand on change la position d'équilibre de ses molécules par la pression, le choc et la torsion ; c'est pour ce motif que les outils de fer sont aimantés au bout de peu de temps qu'ils ont servi. Si l'on frappe légèrement un barreau tenu verticalement par un de ses bouts avec un marteau, on lui donne la polarité magnétique ; en le retournant pour frapper l'autre extrémité, on renverse la polarité. Toutes les substances qui renferment du fer, soit par voie de mélange, soit par voie de combinaison, agissent sur l'aiguille aimantée, c'est-à-dire exercent sur elle une action attractive ; mais, pour l'apercevoir, il faut employer quelquefois des appareils délicats, dont nous ne pouvons encore donner la description. Ces substances, quoique réagissant comme le fer doux sur l'aiguille aimantée, n'acquièrent jamais la polarité. De là la distinction entre

un corps magnétique et un corps aimanté ; le premier est attiré également en tous ses points par le même pôle, tandis que l'autre est attiré d'un côté et repoussé de l'autre.

Le nickel et le cobalt, dans le plus grand état de pureté où l'on puisse les obtenir, jouissent de la propriété, non-seulement d'être attirés par un aimant, mais encore d'acquérir la propriété polaire, lorsque l'on y fait naître une force coercitive en les combinant en certaines proportions avec du charbon, du phosphore, du soufre ou de l'étain.

On a cherché, à plusieurs reprises, à former des aimants avec des pâtes magnétiques formées de deutoxide de fer, ou de poussière de fer, mêlé avec des corps gras, tels que de l'huile de lin. Cette pâte, séchée à une douce chaleur pour éviter qu'elle n'éclate, finit par acquérir assez de dureté. Les premiers essais de ce genre sont dus à Knight (1). Ingenhouz a construit aussi de ces aimants ; le corps gras était du fromage mêlé avec de la chaux vive réduite en poudre très-fine. Il a trouvé que les aimants préparés avec de la poudre d'aimant avaient plus de force que ceux qui étaient faits avec de la poudre de fer, et que l'on pouvait faire naître dans leur masse autant de pôles que l'on voulait, par le simple contact d'un barreau aimanté.

---

(1) Phil. Transact., t. LXIX, p. 51.

CHAPITRE II.

DE L'ACTION DU GLOBE SUR LES AIGUILLES AIMANTÉES.

§ Ier. *Phénomènes généraux; des boussoles.*

160. Les aiguilles aimantées employées dans les expériences magnétiques sont des aiguilles d'acier trempé, très-minces, et ayant la forme d'un losange très-alongé; tantôt elles sont suspendues, au moyen de chapes en agate, sur des pointes d'acier très-fines; tantôt, suivant leur poids, à des fils simples de soie, ou à un assemblage de fils de soie sans torsion. Nous donnerons plus loin la théorie de leur forme et de leur construction.

Une aiguille aimantée, librement suspendue et abandonnée à elle-même, ne tourne pas indifféremment dans toutes les directions; elle se place, après un certain nombre d'oscillations plus ou moins rapides, dans une direction déterminée, à laquelle elle revient toujours quand on l'en écarte. Cette direction, en Europe, est à peu près N.-N.-O. et S.-S.-E. Le plan vertical qui passe par cette direction est le méridien magnétique du lieu où l'on observe: on le croyait jadis peu différent du méridien astronomique; mais on sait parfaitement aujourd'hui que l'angle compris entre ces deux plans varie non-seulement d'un lieu à un autre, mais encore dans le même lieu, avec le temps, et d'une manière régulière, toutes les vingt-quatre heures. On appelle cet angle, *déclinaison de l'aiguille aimantée*, et l'appareil destiné à le déterminer, *boussole de déclinaison*.

La déclinaison est orientale, nulle, ou occidentale, selon que le méridien magnétique est à l'orient du méridien terrestre, coïncide avec lui, ou est à l'occident. La direction de l'aiguille aimantée, dans la partie du globe que nous habitons, a servi à caractériser les deux pôles ; on a nommé *pôle boréal*, celui qui regarde le nord, et *pôle austral*, celui qui est tourné vers le sud.

La détermination de la déclinaison sur différents points du globe étant d'une grande importance pour la physique générale et la navigation, nous devons donner ici la description des boussoles les plus parfaites qui servent aux recherches magnétiques. Nous prendrons pour guide M. Pouillet (1), qui a décrit, avec beaucoup de soin, ces appareils, dans son traité de physique.

BOUSSOLE DE DÉCLINAISON.

161. Cet instrument est représenté dans les figures 65, 66 et 67.

mm' (fig. 65) est l'aiguille dont les pôles sont en *a* et *b*; vers son centre, elle est percée d'une ouverture *t* de 7 à 8 millimètres de diamètre, afin de pouvoir être soumise facilement à la méthode du retournement : elle est équilibrée d'elle-même sans contre-poids quand elle est aimantée.

cc' (fig. 68) est une coupe de la chape en agate. Cette pièce doit être travaillée avec un grand soin, surtout à son sommet intérieur, où est la petite surface courbe qui doit reposer sur la pointe du pivot *p*, et à son contour extérieur, où vient s'ajuster l'ouverture centrale de l'aiguille. Le pivot *p* a sa pointe travaillée sous un angle de 15 à 20° (2). L'anneau *aa'* est destiné à soulever la chape de l'aiguille, pour décharger le pivot quand l'appareil n'est pas en expérience. La tige

(1) Éléments de physique, t. 1er, p. 460.

(2) Coulomb. Sur le frottement des pivots, Mém. de l'Inst., t. III.

de cet anneau se prolonge jusqu'à l'extérieur de la boîte, où elle s'ajuste à un bouton qui l'élève ou l'abaisse à volonté.

La figure 66 représente la coupe de la boussole.

mm' est l'aiguille;

cc' un cercle divisé, pour déterminer les déviations de l'aiguille;

bb' le bord de la boîte, qui est en cuivre rouge, comme tout le reste de l'appareil;

vv' le verre qui ferme la boîte, pour éviter l'agitation de l'air;

xy un axe solide qui fait corps avec le fond de la boîte, et qui peut tourner sur son extrémité conique inférieure dans une petite cavité de la vis *w*.

Cette rotation emporte l'axe, la boîte et toutes les pièces adhérentes. Mais en même temps le pied de l'instrument reste fixe, ainsi que le cylindre *ll'* qui enveloppe l'axe *xy*, et qui est destiné à porter le cercle divisé *zz'* que l'on appelle *cercle azimuthal*, au moyen de six rayons, tels que *or* et *o'r'*.

Deux nonius, diamétralement opposés, dont l'un est représenté en *nn'* (fig. 16), sont fixés sur le bord de la boîte pour tourner avec elle, et pour marquer de quel angle elle tourne, soit en partant du zéro, soit en partant d'une division donnée du cercle azimuthal.

Les vis calantes VV' servent à rendre l'appareil horizontal au moyen du niveau NN'.

LL' (fig. 67) est une lunette; elle est portée sur un axe de rotation AA' parallèle au cercle des azimuths, et dont le milieu est dans la verticale du pivot. On remplit cette condition au moyen des petites vis qui terminent le montant M'. Dans son mouvement de rotation, la lunette emporte un nonius *ius* qui parcourt l'arc divisé DD', et qui donne immédiatement l'angle du rayon visuel avec l'horizon.

162. La boussole marine, ou compas de variation, n'est autre chose qu'une boussole de déclinaison, disposée de manière que l'aiguille reste toujours dans une posi-

tion horizontale, quelle que soit l'agitation du vaisseau.

Les figures 69 et 70 (1) représentent une vue et une coupe de cet instrument.

bb', bords de la boîte dont le fond est en *ff'*;

v, verre qui la ferme;

p, pivot qui peut être élevé ou abaissé au moyen de la vis *w*;

gg', aiguille dont la chape est en *c*;

rr', feuille mince de papier doublée d'une feuille de talc ou de quelque autre substance légère et rigide. Ces feuilles forment ce qu'on appelle la *rose des vents*; elles sont attachées ou collées à l'aiguille pour se mouvoir avec elle. La rose est un cercle dont le centre est dans la verticale du pivot, et dont la circonférence porte à la fois des divisions en degrés et les signes des vents.

pp', deux pinnules, la première ayant une fente étroite, et la seconde, une large fente au milieu de laquelle on suspend un petit fil à plomb.

M, miroir à faces bien parallèles, incliné de 55°, ayant à peu près la largeur de la pinnule oculaire *p*. La petite bande du miroir qui correspond à la fente de cette pinnule est désétamée dans sa partie supérieure seulement, pour que l'observateur puisse, au travers de la glace, viser au fil de la pinnule *p'*.

o, position de l'œil au moment de l'observation. Au moyen des deux pinnules, on vise à un astre ou à un objet situé dans l'horizon, ou élevé de 15 ou 20°. En même temps on voit par réflexion, sur le miroir, en *i* une portion de la ligne de foi *f* qui est peinte en noir sur le bord intérieur de la boîte, et en *i'* la division de la rose qui se trouve vis-à-vis de la ligne de foi, c'est-à-dire, dans le plan vertical du pivot et des fentes des pinnules.

---

(1) Pouillet, Éléments de physique, t. 1er, p. 463.

De cette manière, on connaît d'un seul coup d'œil l'angle de l'aiguille ou du méridien magnétique avec le plan vertical de l'astre ou de l'objet. Il reste à déterminer par les moyens connus l'angle de ce dernier plan avec le méridien astronomique du lieu, pour en déduire la déclinaison. Tout l'instrument est porté sur une traverse, qui se visse au moyen de la plaque P, sur un pied où elle peut tourner librement. Un cercle fixe CC′ est porté sur cette traverse; un cercle intérieur *cc′* repose sur le premier et tourne sur l'axe XX′; enfin la boîte elle-même est portée par ce cercle mobile, et tourne sur lui, au moyen de l'axe ZZ′ qui est perpendiculaire à XX′. C'est par ces deux mouvements rectangulaires que la boîte conserve son horizontalité; ils constituent ce qu'on appelle la *suspension de cardan.*

163. Maintenant que nous savons qu'une aiguille aimantée, librement suspendue, se place toujours dans une direction déterminée, en vertu de l'action de la terre, il s'agit de voir ce qui se passe quand on lui présente à une certaine distance l'un des pôles d'un barreau aimanté, capable d'exercer sur elle une action plus forte que celle de la terre; elle quitte sur-le-champ sa position d'équilibre pour lui présenter le pôle de nom contraire et en prendre une nouvelle, dans laquelle elle revient quand on l'en écarte, après avoir effectué un certain nombre d'oscillations.

L'action de la terre sur une aiguille de boussole étant semblable à celle qu'exerce sur celle-ci un aimant, on considère donc le globe comme un aimant dont les pôles seraient très-rapprochés des pôles de rotation.

Il résulte de là, qu'en considérant le globe terrestre comme un aimant, le pôle nord ou boréal d'une aiguille appartient réellement à la moitié de l'aiguille où se trouve le magnétisme austral, et le pôle austral à celle où réside le magnétisme boréal; mais comme cette dénomination est généralement adoptée, nous ne la changerons pas.

Le globe étant un aimant, nous devons chercher les moyens de déterminer la résultante des actions qu'il exerce en général sur une aiguille de boussole.

Or, il faut trois éléments pour constituer une force, la direction, l'intensité et le point d'application. L'aiguille horizontale nous donne bien la trace du plan vertical dans lequel se trouve la résultante des forces magnétiques du globe; mais quelle est sa direction dans ce plan? Pour la trouver, il faut disposer un appareil qui permette à l'aiguille de se mouvoir librement dans ce plan : l'angle que forme cette direction avec la verticale, et qui n'est pas le même pour tous les lieux de la terre, se nomme *inclinaison magnétique*, et l'appareil destiné à le trouver, *boussole d'inclinaison*.

Nous allons encore donner, d'après M. Pouillet, la description de cette boussole.

164. La fig. 71 représente l'aiguille d'inclinaison gg' vue sur sa largeur, et la fig. 72 la représente vue sur son épaisseur. Les sections s, s', s'' donnent une idée de la forme.

EE' est une sorte de virole ou d'anneau en cuivre, qui s'ajuste à frottement très-dur vers le milieu de la longueur de l'aiguille; il porte un axe en cuivre cc', terminé par de petits cylindres d'acier poli a, a' qui forment l'axe de rotation. L'axe mathématique de ces deux cylindres aa' doit passer par le centre de gravité de l'aiguille. On essaie d'atteindre cette condition, ou du moins d'en approcher le plus possible, en plaçant l'anneau convenablement et en faisant mouvoir les vis latérales vv', fig. 72.

L'aiguille est en place, fig. 73; le rectangle sur lequel elle repose est une pièce importante de la boussole.

On le voit plus en grand et avec plus de détails dans la figure 74, qui ne contient que l'un de ses côtés. Il se compose d'une traverse fixe TT', qui porte le couteau d'agate pp', et d'une autre traverse MM' mobile autour de l'axe A. Celle-ci porte une fourchette f, qui soulève l'axe de l'aiguille quand on ne veut plus qu'elle

repose sur le couteau d'agate, et d'une pièce d'arrêt R qui empêche l'axe de glisser sur la fourchette. Cet ajustement est combiné pour que l'axe de l'aiguille se trouve exactement au centre du limbe d'inclinaison LL′ (figure 73), et perpendiculaire à son plan dès qu'on abaisse la fourchette pour commencer l'observation.

Le limbe LL′ repose perpendiculairement sur une plaque solide PP′, qui porte aussi les montants du rectangle, une cage en verre CC′ et un niveau NN′. Tout ce système est mobile autour d'un axe vertical XX′ qui passe par le centre du cercle LL′, et par conséquent par le centre de gravité de l'aiguille. Un nonius *nn′*, attaché à la plaque PP′, parcourt le cercle azimuthal ZZ′ pour marquer à chaque instant sur ce plan les angles décrits par le limbe vertical.

Pour observer l'inclinaison magnétique dans un lieu, on place le limbe vertical dans le plan du méridien magnétique, et après quelques oscillations, l'aiguille vient se placer dans la direction de la ligne d'inclinaison. On corrige les erreurs relatives à l'irrégularité de l'aimantation et à l'excentricité du centre de gravité en retournant les faces de l'aiguille sans renverser les pôles; puis l'on fait deux autres observations, en renversant les pôles de l'aiguille au moyen d'une nouvelle aimantation. La moyenne de ces quatre observations donne les résultats cherchés.

L'aiguille de déclinaison, dans tous les lieux de la terre, est sujette à plusieurs genres de variations, qui la font sortir de sa position ordinaire d'équilibre. Ces variations sont diurnes, annuelles ou brusques, selon qu'elles ont lieu toutes les vingt-quatre heures, tous les ans ou accidentellement; mais leur amplitude, surtout celles des deux premières, ne s'élevant pas au-delà de 25′, il faut pour les observer des boussoles autres que celles dont nous venons de donner la description. Les appareils qui servent à cet usage se nomment *boussoles de variation;* toutes les pièces de métal qui s'y trouvent sont en cuivre rouge. Voici la description que

M. Pouillet a donnée d'une de ces boussoles (fig. 75) :

165. MM', table de marbre blanc, sur laquelle reposent les colonnes et la boîte de l'instrument.

LL', colonnes pour la suspension.

$L_1 L'$, colonnes pour le premier microscope.

$L_2 L'_2$, colonnes pour le deuxième microscope.

BB', boîte de la boussole.

AA', aiguille aimantée, passée de champ dans un petit anneau de cuivre *aa'*; à cet anneau est attaché un assemblage de fils de soie sans torsion, qui porte l'aiguille et vient s'enrouler sur le petit treuil *t*. Ce fil est maintenu au centre du cercle divisé *cc*, en traversant là une petite ouverture triangulaire; il est enfermé dans une petite cage de verre, qui s'élève entre les deux colonnes LL', pour que l'air ne puisse ni l'agiter, ni pénétrer dans la boîte. En tournant le treuil *t*, dans un sens ou dans un autre, on peut élever ou abaisser l'aiguille. Deux lames de verre mobiles à volonté ferment les ouvertures de la boîte, qui correspondent aux deux extrémités de l'aiguille; sur chacune de ces extrémités est solidement fixée une petite plaque d'ivoire, portant des divisions très-fines, dont la distance angulaire dépend de la distance au centre de suspension; c'est en général 15 ou 20″, quand il s'agit seulement d'observer les variations diurnes.

On dispose d'abord l'appareil dans le plan du méridien magnétique; et après l'avoir nivelé, on place les microscopes sur la ligne de foi de l'aiguille, dont la trace est indiquée sur les deux plaques d'ivoire. Il est facile ensuite d'observer les déplacements qu'elle éprouve, soit en comptant les divisions qui ont passé sous le fil, soit en suivant ses mouvements, au moyen des vis de rappel qui font marcher les microscopes.

Des loupes *pp'*, mobiles sur les tiges *tt'*, servent à lire la position ou la course de chaque microscope, sur la traverse qui le porte et qui règle son mouvement latéral.

Une lunette T″ est destinée à compter plus commo-

dément et plus sûrement les oscillations de l'aiguille, lorsqu'on veut déterminer l'intensité magnétique. Elle porte au-devant de l'objectif un miroir, qui ramène les rayons verticaux dans la direction de son axe.

L'aiguille d'inclinaison est probablement soumise aussi à des variations diurnes et annuelles; mais jusqu'ici elles n'ont pas été observées.

166. Quelquefois on a besoin d'expérimenter avec une aiguille de boussole, sur laquelle le magnétisme terrestre n'exerce aucune action sensible, et qui, en raison de cela, porte le nom d'*aiguille astatique*. Voici la description d'un appareil où cette condition est remplie. On dispose (fig. 76) une boussole dont l'axe, autour duquel oscille l'aiguille, puisse être amené dans la direction de la résultante des forces magnétiques du globe; l'aiguille ne saurait être influencée en aucune manière par l'action de cette résultante. On dirige l'axe au moyen de deux mouvements rectangulaires, l'un avec une vis sans fin V et un rouet G dans lequel elle s'engrène; l'autre avec une vis V′ et un rouet G′ : un cercle CC′ sert à marquer les positions de l'aiguille. On peut aussi se procurer un système astatique en plaçant, aux deux extrémités d'une tige métallique, deux aiguilles parfaitement semblables, également aimantées, dans une position parallèle, les pôles inverses en regard. Si toutes ces conditions étaient remplies, la terre ne saurait exercer aucune action sur cet appareil.

167. Ayant déterminé la direction de la résultante des forces magnétiques du globe, rien n'est plus simple que de démontrer que ces forces sont réellement magnétiques. Prenons une barre de fer doux, d'un mètre de long, et plaçons-la dans la direction de cette même résultante, à peu de distance des pôles d'une aiguille aimantée librement suspendue, celle-ci recevra le même mode d'action que si la barre était un aimant; le bout qui est tourné du côté du pôle nord de la terre agira comme le pôle boréal d'un barreau aimanté, et l'autre comme le pôle austral; en renversant la barre, l'effet est encore le même: ainsi,

sous l'influence terrestre, elle est devenue un aimant, comme si les deux extrémités avaient été placées entre les pôles opposés de deux aimants. Cette expérience ne réussit complétement qu'autant que la force coercitive est excessivement faible; car si elle était sensible, la décomposition du magnétisme naturel et la recomposition des deux fluides ne seraient pas instantanées.

On doit rapporter à cette cause l'aimantation qu'acquièrent les tiges verticales de fer qui restent élevées pendant long-temps sur les bâtiments. Le fer s'oxidant et restant exposé aux variations de température, s'écrouit et devient apte à conserver le magnétisme que le globe y développe continuellement par influence. Cette cause n'est pas la seule, comme nous le verrons plus loin, qui produise la polarité magnétique dans ces tiges; car l'électricité atmosphérique qui s'écoule fréquemment par leurs pointes concourt au même but.

L'aimantation du fer doux, par la torsion et le choc, s'explique également par l'action du magnétisme terrestre; en général, toutes les actions mécaniques qui peuvent écrouir le fer, lui permettent de conserver le magnétisme qui s'y développe par influence.

Dans les aiguilles aimantées qui servent aux observations sur le magnétisme terrestre, on doit éviter les points conséquents; en voici la raison : les points placés du même côté du centre de suspension, qui ont des magnétismes de nature contraire, agissent sur le magnétisme terrestre d'une manière inverse, les uns ayant une tendance à ramener l'une des extrémités de l'aiguille dans une position, les autres dans une position contraire. Il en résulte que la force directrice est généralement plus faible que si la distribution du magnétisme était régulière de chaque côté du point de suspension. On doit donc, sous tous les rapports, préférer les aiguilles dans lesquelles ce mode de distribution est bien constaté.

§ II. *De la détermination de la résultante des forces magnétiques du globe.*

168. La direction de la résultante des forces magnétiques du globe est donnée par la boussole de déclinaison et celle d'inclinaison. Les points d'application des deux composantes et leur intensité sont déterminés par des procédés particuliers.

Supposons une aiguille aimantée librement suspendue, et n'obéissant qu'à l'action du magnétisme terrestre. Si l'on considère un élément quelconque de cette aiguille, suffisamment petit pour qu'il ait un état magnétique uniforme et qu'il possède une petite quantité de magnétisme boréal libre, cet élément sera repoussé par les forces boréales de tous les points de la terre, et attiré par les forces australes avec une énergie proportionnée à cette quantité de magnétisme. L'action de toutes ces forces, sur l'élément, pourra être remplacée par celle de deux autres forces égales, parallèles et dirigées en sens contraire. Il en sera de même pour un autre élément. Mais comme les points d'application de ces résultantes partielles sont situés à une distance infinie relativement aux dimensions de l'aiguille, leurs directions seront nécessairement parallèles entre elles. La question se trouve donc ramenée à la détermination de la résultante et de son point d'application de forces parallèles qui forment deux systèmes, l'un composé de forces agissant dans un sens sur tous les points de l'une des moitiés de l'aiguille, et l'autre composé de forces agissant dans un autre sens sur tous les points de l'autre moitié.

Or les principes de statique, relatifs à l'équilibre des corps sollicités par des forces parallèles, nous indiquent que la résultante doit être parallèle aux composantes. Il en résulte que l'action du magnétisme terrestre sur une aiguille aimantée peut être représentée par celle de deux forces égales, parallèles et dirigées en sens contraire et dont

les points d'application se trouvent de chaque côté du point de suspension de l'aiguille, à égale distance des extrémités, pourvu néanmoins que la distribution du magnétisme libre soit la même dans chacune des deux moitiés. Ces points d'application ne pourront être déterminés que lorsque nous connaîtrons cette distribution, puisque l'action qu'exerce le magnétisme terrestre sur l'aiguille est dépendante de la quantité de magnétisme libre qu'elle possède. Quoique ces points ne puissent être encore déterminés, on a cependant quelques données sur leur position relative. Les aiguilles ayant toujours la forme d'un cylindre, d'un losange très-alongé ou d'un solide, qui est symétrique par rapport à un axe longitudinal, il s'ensuit que l'aimantation étant régulière, la distribution du magnétisme est la même dans chaque moitié; les points d'application des deux résultantes, qui ne sont autres que les pôles de l'aiguille, doivent donc se trouver sur la ligne qui les joint, à égale distance des extrémités. Cette ligne est appelée *axe de l'aimant*. Nous avons supposé que la construction de l'aiguille était parfaitement symétrique par rapport à l'axe de figure, et que l'aimantation était la même dans toute l'étendue de l'aiguille; mais cette condition est rarement remplie, ce qui fait que l'axe magnétique ne coïncide pas avec l'axe de figure, et, dans ce cas, il est impossible de prendre l'un pour l'autre. Pour éviter cette cause d'erreur, quand on opère avec la boussole de déclinaison ou celle d'inclinaison, il faut faire usage de la méthode du retournement et de celle du renversement des pôles.

La première consiste à observer d'abord la déclinaison avec l'aiguille, telle qu'elle se trouve placée dans la boussole; puis à faire la même opération en retournant l'aiguille sans changer la position des pôles, de manière que la face supérieure devienne la face inférieure : la moyenne des deux résultats donne la valeur cherchée. En effet, le point de suspension restant le même, la trace du méridien terrestre du lieu où l'on observe continue à passer par ce point; de plus, en retournant l'ai-

guille, la ligne des pôles reste parallèle à elle-même, puisque c'est une condition de l'équilibre de l'aiguille. La ligne moyenne entre ces deux lignes, qui passe par le centre de suspension, est précisément celle que l'on a intérêt de connaître, car l'angle cherché est celui que forme le méridien terrestre avec cette ligne dont on ne connaît point encore la direction, parce qu'on ignore où sont les pôles. Or, si l'on trace sur le papier ces diverses lignes et les deux qui représentent les axes de figure dans les deux positions de l'aiguille, lesquels axes passent par le centre de suspension et font le même angle avec le méridien magnétique, on voit sur-le-champ que la déclinaison est égale à la demi-somme des angles que les deux axes font avec le méridien terrestre. La position de l'axe de figure étant connue, ainsi que celle du méridien terrestre, on voit que la méthode de retournement donne immédiatement la déclinaison, sans qu'il soit nécessaire de déterminer préalablement la position de l'axe magnétique.

On emploie aussi la méthode du retournement dans les observations relatives à l'aiguille d'inclinaison, afin de corriger les erreurs qui proviennent d'une aimantation irrégulière et d'un déplacement dans le centre de gravité. Quant à la méthode du renversement des pôles, elle est nécessaire pour éviter les erreurs qui dépendraient du défaut d'homogénéité dans toutes les parties de l'aiguille.

169. Passons maintenant à la détermination de l'intensité de la résultante des forces magnétiques terrestres. On peut supposer que chacune des résultantes partielles que l'on a indiquées soit décomposée en deux autres, l'une dans le sens de l'aiguille de déclinaison, et l'autre perpendiculaire à sa direction. Les deux forces perpendiculaires n'impriment aucun mouvement à cette aiguille, puisqu'elle ne peut se mouvoir que dans un plan horizontal; les deux autres, agissant dans la direction de l'aiguille, en sens contraire, la ramènent continuellement dans le plan du méridien magnétique lorsqu'on l'en écarte

avec une vitesse dépendante de la force du magnétisme terrestre et du magnétisme libre de l'aiguille. Cette vitesse est mesurée par le nombre d'oscillations exécutées dans un temps donné; l'aiguille, relativement aux forces magnétiques terrestres, se comporte donc comme un pendule par rapport à la pesanteur; il s'ensuit que la formule du pendule peut servir à déterminer l'intensité de ces forces.

On prend une aiguille de déclinaison aimantée régulièrement, et dont la distribution du magnétisme n'éprouve aucun changement non-seulement pendant l'expérience, mais encore pendant la durée de toutes celles que l'on doit faire; car le moindre changement influerait sur l'intensité de la résultante et la position de son point d'application. On la fait osciller en différents points de la surface du globe; la différence dans la vitesse des oscillations ne peut provenir que des changements survenus dans l'intensité du magnétisme terrestre, puisque celle de l'aiguille n'a pas changé; or les forces qui ont agi successivement sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps : on en déduit alors les variations qu'éprouve l'intensité du magnétisme terrestre en différents points du globe.

170. Pour être plus certain du résultat, on fait osciller de la même manière l'aiguille d'inclinaison de chaque côté de sa position d'équilibre, en l'en écartant de plusieurs degrés.

Il est nécessaire de répéter cette expérience un certain nombre de fois, avec plusieurs aiguilles qui servent à se vérifier l'une l'autre, et de prendre la moyenne de tous les résultats. Pour être bien certain que les aiguilles n'ont pas perdu de leur magnétisme, on doit revenir dans les lieux où l'on a déja expérimenté, pour recommencer les opérations et voir si les résultats sont semblables.

La méthode précédente, pour trouver la force qui fait osciller l'aiguille de déclinaison, n'est pas applicable

aux localités où l'inclinaison est très-grande, comme aux environs des pôles magnétiques, parce que cette force est alors très-petite. Pour parer à cet inconvénient, on a recours à une autre méthode (1). Si l'on représente par i l'angle d'inclinaison d'un lieu, par M la force magnétique terrestre, en la décomposant en deux autres, l'une verticale, et l'autre horizontale; la première, qui est détruite par la suspension, a pour expression M sin. i, et l'autre, qui fait osciller l'aiguille de déclinaison, M cos. i. Pour un autre lieu, dont la force magnétique serait M' et l'inclinaison i', on aurait, pour les composantes verticale et horizontale, M' sin. i' et M' cos. i'. En représentant par N et N' les nombres d'oscillations exécutées dans le même temps, on aurait:

$$\frac{N^2}{N'^2}=\frac{M\cos. i}{M'\cos. i'}\text{ ou }\frac{M}{M'}=\frac{N^2.\cos. i'}{N'^2.\cos. i}.$$

Cette formule permet d'expérimenter dans les lieux où l'inclinaison est considérable, et dispense de faire osciller l'aiguille d'inclinaison, qui se prête moins bien aux expériences d'oscillations que l'aiguille de déclinaison, attendu que son mode de suspension produit trop de frottement, et qu'elle est beaucoup plus difficile à s'équilibrer que l'autre.

§ III. *Détermination du moment de la force directrice d'une aiguille.*

171. Coulomb a encore donné une autre méthode pour déterminer l'intensité de la force directrice d'une aiguille, qu'il appelle son *momentum magnétique.*

L'énergie avec laquelle l'aiguille est ramenée dans le méridien magnétique dépend de l'intensité des composantes horizontales des forces attractives et répulsives

(1) Pouillet. Éléments de phys., 1828, t. 1er, p. 480.

qui agissent sur elle, ainsi que de la position de leurs points d'application, puisque l'axe magnétique peut être considéré comme un levier, sollicité par deux forces égales et dirigées en sens contraire.

Nous avons comparé l'effort des forces horizontales pour ramener l'aiguille dans le méridien magnétique, quand on l'en a écarté, à celui de la pesanteur, pour ramener également un pendule dans la direction de la verticale; cet effort est proportionnel au sinus de l'écart, comme on peut le voir en construisant le parallélogramme des forces.

Coulomb a vérifié cette loi avec sa balance magnétique. L'aiguille aimantée tord le fil métallique d'un certain nombre de degrés, jusqu'à ce qu'il oppose une résistance égale à l'action des forces rotatoires. Supposons l'aiguille dans le plan du méridien magnétique et le fil sans torsion; si l'on tord celui-ci d'un certain nombre de degrés, l'aiguille suivra le mouvement, et, après un certain nombre d'oscillations, se fixera dans une nouvelle position d'équilibre. En répétant plusieurs fois cette opération, pour plusieurs écarts de l'aiguille, on aura les torsions correspondantes qui sont nécessaires pour leur faire équilibre. Or, la réaction de torsion est proportionnelle à l'arc de torsion; les arcs pourront donc servir à mesurer les forces directrices pour divers écarts.

Coulomb a fait quelque changement à la balance de torsion, pour la changer en balance magnétique fig. 77 (1). Le fil de suspension *ag* (fig. 78) porte à son extrémité inférieure une pince *ab*, qui saisit un étrier formé avec une lame de cuivre très-légère. Dans cet étrier, on place un petit plan de carton, couvert d'un enduit de cire d'Espagne, sur lequel on imprime l'empreinte du fil ou barreau d'acier qui sert aux expériences, afin de le mettre toujours dans la même position. Sous le milieu de l'é-

(1) Mémoires de l'Acad. des scienc. pour 1789, p. 458.

trier, on fixe un plan vertical, qui est destiné à rester entièrement submergé dans un vase rempli d'eau, afin que la résistance qu'il en éprouve arrête promptement les oscillations de l'aiguille aimantée placée dans l'étrier. La balance est placée de manière que l'un de ses côtés soit dirigé dans le méridien magnétique.

Coulomb ayant soumis de cette manière, à l'expérience, une aiguille aimantée de 22 pouc. de longueur et 1 ligne et demie de diamètre, fixée à l'extrémité d'un fil de cuivre de 6 pouces de long et pesant cinq grains, a trouvé les résultats suivants :

NOMBRE de tours dont le fil a été tordu.	ANGLE de déviation où l'aiguille s'est arrêtée.	FORCE de torsion qui en résulte.
0	0	0
1	10 $\frac{1}{2}$	349 $\frac{1}{2}$
2	21 $\frac{1}{4}$	698 $\frac{3}{4}$
3	33	1047
4	46	1394
5	63 $\frac{1}{2}$	1736 $\frac{1}{2}$
5,5	85	1895

Les trois premiers résultats montrent que, pour des écarts d'un petit nombre de degrés, les forces de torsion sont proportionnelles aux angles ou à leurs sinus. Pour s'assurer si cette loi a également lieu pour de plus grands angles, il faut diviser chaque torsion par le sinus de l'angle de déviation, et voir si le quotient est le même; or, c'est ce que le calcul donne à peu près.

DÉVIATION OBSERVÉE.	RÉSULTAT DE LA DIVISION.
10 $\frac{1}{2}$	1902,24
21 $\frac{1}{4}$	1940,37
33	1937,89
46	1922,30
63 $\frac{1}{2}$	1927,92
85	1917,85
Moyenne	1917,76

1917,76 représente la force de torsion qui serait nécessaire pour maintenir l'aiguille aimantée à 90°, puisqu'on a

$$\frac{\text{force de tor.}}{\sin.\ 90^\circ} = 1917{,}76 : \text{or, } \sin.\ 90^\circ\ 1 = 1;$$

donc force de torsion $= 1917{,}76$.

Pour un écart quelconque on aura, en représentant cet écart par e et la force de torsion correspondante par t,

$$\frac{t}{\sin.\ e} = 1917{,}76, \text{ ou } \sin.\ e = \frac{t}{1917{,}76}.$$

Il résulte de là, qu'en divisant la torsion correspondante à un écart donné par 1917,76, on a le sinus de l'angle où l'aiguille s'est arrêtée.

TORSION observée.	DÉVIATION		EXCÈS du calcul.
	observée.	calculée.	
349°,5'	10°,30'	10°,28'	— 0,2
698,75	21,15	21,17	+ 0,2
1047	33	32,57	— 0,3
1394	46	46,21	+ 0,24
1736,5	63,30	64,27	+ 0,57
1895	85	79,55	— 5,5

La différence la plus sensible est la dernière : peut-être tient-elle à l'altération que le fil a éprouvée dans son élasticité par suite d'une grande torsion. Ainsi on peut regarder la loi du sinus comme complétement vérifiée.

§ IV. *Comparaison des moments magnétiques de différentes aiguilles d'acier de même diamètre et de différentes longueurs.*

172. Coulomb va encore nous servir de guide pour traiter cette question.

Pour comparer les forces directrices de deux aiguilles, on les place successivement l'une après l'autre dans l'étrier de la balance magnétique, et l'on tord chaque fois le fil de suspension d'un nombre de degrés suffisant pour les maintenir à la même distance angulaire du méridien magnétique. Les deux forces de torsion mesurent les moments des forces directrices des deux aiguilles. Pour la précision des résultats, il faut proportionner la force de torsion des fils de suspension à la force des aimants, de manière qu'en éloignant les aiguilles à 30° de leur méridien, la force de torsion des fils de suspension qui la retiennent à cette distance, soit au moins de 25 à 30°.

Les aiguilles dont Coulomb a fait usage provenaient d'un fil d'acier passé à la filière; il les plaça successivement dans l'étrier, et tordit le fil de suspension jusqu'à ce que l'aiguille fît un angle de 30° avec le méridien magnétique. Voici les résultats de plusieurs expériences :

La force de torsion nécessaire pour retenir une aiguille de 12 pouces à 30 degrés, était mesurée par 11°,50; pour une longueur de 9 pouces, il fallait une force de 8,50. Dans ces deux essais, la diminution de la force directrice a donc été d'un degré par pouce. En continuant, il a trouvé que de 9 pouces à 6 et de 6 à 3, la diminution de la force directrice a encore été d'un degré environ par pouce; de 3 pouces à 1 pouce, elle a été de deux degrés : d'où il a conclu que, jusqu'à ce qu'une aiguille, qui pèse 38 grains, soit réduite à 1 pouce de longueur, il existe un rapport constant entre

les quantités dont les aiguilles sont diminuées, et celles dont les forces directrices diminuent, et que depuis 1 pouce jusqu'à $\frac{1}{4}$ de pouce, les moments sont à peu près comme les carrés des longueurs des fils.

§ V. *Du moment de la force directrice des aiguilles relativement à leur diamètre.*

173. Coulomb ayant reconnu qu'il était presque impossible de se procurer deux aiguilles d'acier de différents diamètres, qui eussent exactement le même degré de ressort, et fussent d'une nature homogène, forma des faisceaux avec des aiguilles très-fines et de même diamètre. Il avait remarqué qu'en tordant autour de son axe un fil de fer d'une demi-ligne environ de diamètre, ce fil, par l'effet de l'écrouissement, prenait à peu près le même degré de magnétisme qu'un fil d'acier de même diamètre. Il choisit en conséquence un fil de fer très-pur, tel qu'il sort de la filière, de 120 pieds de long; l'ayant coupé en différentes parties, il les tordit toutes autour de leur axe, puis il forma des faisceaux de différents diamètres et de différentes longueurs, qu'il aimanta à saturation. Ces faisceaux furent placés ensuite dans la balance magnétique. Il trouva d'abord que, dans deux aiguilles de même nature et dont les dimensions sont homologues, si l'on prend, par exemple, une aiguille d'une ligne de diamètre et de 6 pouces de longueur, et une autre de deux lignes de diamètre et de 12 pouces de longueur, les moments magnétiques sont entre eux comme 1 : 8, c'est-à-dire, comme les cubes de leurs dimensions homologues.

Ayant tordu autour de leur axe 36 fils de fer d'un pied de longueur, pesant 48 grains chacun, il forma avec toutes ces aiguilles un faisceau bien serré qu'il aimanta à saturation; placé dans l'étrier, il fallut une force de torsion de 342 degrés pour le maintenir à 30 degrés du méridien magnétique. Avec un second faisceau formé de 9 aiguilles de 6 pouces chacune de longueur, de même nature et de même diamètre que les précédentes,

il fallut employer une force de torsion de 42 degrés. Dans ces deux faisceaux, le rapport des côtés homologues est de 2 à 1, puisque les diamètres sont comme les racines carrées du nombre des aiguilles ; ainsi les cubes des diamètres sont entre eux comme 8 : 1 ; mais les moments des deux faisceaux sont comme 342 : 42 ou 8,14 : 1 ; rapport qui diffère très-peu de 8 à 1. On voit donc que les forces directrices sont proportionnelles au cube des diamètres des deux faisceaux.

§ VI. *Détermination de l'intensité absolue du magnétisme terrestre.*

174. Une question importante relative au magnétisme terrestre a occupé, il y a quelques années, les physiciens, c'est celle de la détermination de l'intensité absolue du magnétisme terrestre. On sent parfaitement combien il serait important, pour la physique terrestre, de pouvoir vérifier à une époque quelconque si la force magnétique du globe, en différents points, a éprouvé quelques variations. Si l'on pouvait construire des aiguilles parfaitement identiques, qui prissent constamment la même quantité de magnétisme, la question serait facile à résoudre; mais il n'en est pas ainsi; on est obligé d'avoir recours à des méthodes qui présentent plus ou moins de difficultés dans l'exécution : déja on en a proposé plusieurs, mais aucune n'a encore été mise à exécution. J'ai rapporté, dans le Ier volume, pag. 366 et suivantes, les méthodes que nous devons à MM. Poisson et Arago, et sur lesquelles je ne reviendrai pas. Si elles avaient donné lieu à quelques expériences, j'en rapporterais ici le résultat. Nous connaissons maintenant tous les procédés à l'aide desquels on parvient à déterminer la résultante des forces magnétiques terrestres.

Dans le troisième volume, nous montrerons l'usage qu'on en a fait pour réunir un grand nombre d'observations, qui constituent à elles seules une branche importante de la physique terrestre.

CHAPITRE III.

LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.

175. Après avoir exposé les principaux phénomènes relatifs aux attractions et répulsions magnétiques, nous devons donner la loi suivant laquelle elles s'exercent. Coulomb, à qui nous en devons la découverte, a employé deux méthodes pour l'observer. La première consiste à suspendre une aiguille aimantée à un fil de cocon, et à lui présenter, dans le méridien magnétique, à diverses distances, une autre aiguille aimantée, puis à déterminer par l'observation et le calcul la force en vertu de laquelle les deux aiguilles agissent l'une sur l'autre. La seconde méthode exige l'emploi de la balance magnétique, dont nous avons donné plus haut la description. Occupons-nous d'abord de la première méthode.

Coulomb (1) suspendit un fil d'acier pesant 70 grains, d'un pouce de longueur, aimanté à saturation, à un fil de soie de 3 lignes de longueur, et plaça verticalement, dans le méridien magnétique, à diverses distances, un fil d'acier aimanté, de 25 pouces de longueur, de manière que son extrémité australe fût toujours de 10 lignes au-dessous de l'extrémité boréale de l'aiguille suspendue. Il changea la distance à plusieurs reprises, et fit osciller chaque fois l'aiguille en comptant le nombre

---

(1) Mémoires de l'Acad. des sc. pour 1785, p. 594.

d'oscillations exécutées dans le même nombre de secondes ; il obtint les résultats suivants :

1er Essai. L'aiguille soumise à l'action seule de la terre a donné........	15 oscill.	en...	60″.
2e Essai. Le fil placé à 4 pouces du milieu de l'aiguille........	41	en...	60″.
3e Essai. Le fil placé à 8 pouces du milieu de l'aiguille........	24	en...	60″.
4e Essai. Le fil placé à 16 pouces du milieu de l'aiguille.....	17	en...	60″.

Pour calculer l'intensité de la force dans chaque essai, il faut avoir recours à la formule du pendule, d'après laquelle les forces sont en raison directe du carré du nombre d'oscillations exécutées dans le même temps.

L'aiguille ayant oscillé en vertu de la force magnétique du globe et de celle du fil, et toutes les forces se trouvant dans le plan du méridien magnétique, il en résulte que la force qui produit les oscillations dépend de la partie de ces forces décomposée suivant une direction horizontale.

D'un autre côté, Coulomb avait démontré que le fluide magnétique pouvait être supposé réuni à 10 lignes de l'extrémité du fil ; mais l'aiguille suspendue ayant 1 pouce de longueur, l'extrémité boréale étant attirée à une distance de 3 pouces $\frac{1}{2}$, et son extrémité australe repoussée par le pôle inférieur du fil dont la distance est de 4 pouces $\frac{1}{2}$, il en résulte que l'on peut supposer que la distance moyenne à laquelle le pôle inférieur du fil d'acier exerce son action sur les deux pôles de l'aiguille, est de 4 pouces ; dans le second essai, la distance moyenne serait de 8 pouces.

Les forces horizontales qui font osciller l'aiguille étant proportionnelles au carré du nombre d'oscillations

faites dans un temps donné, celle de la terre sera mesurée par 15^2, et les forces réunies de la terre et du fil d'acier, dans le premier essai, le deuxième, etc., par 41^2, 24^2 et 17^2; ainsi, les forces qui émanent du fil d'acier aimanté seront mesurées par les différences 41^2-15^2, 24^2-15^2, 17^2-15^2, d'où l'on peut conclure :

Distance.		Force dépendante de l'action aimantaire du fil d'acier.
2ᵉ Essai,	4 pouces.......	$41^2-15^2=1456$
3ᵉ Essai,	8 pouces.......	$24^2-15^2=351$
4ᵉ Essai,	16 pouces.......	$17^2-15^2=64$

Les deuxième et troisième essais, où les distances sont comme 1:2, donnent, pour les forces, des quantités qui sont à peu près en raison inverse du carré des distances. Le quatrième essai donne un nombre un peu trop petit; mais cela tient, comme l'a prouvé Coulomb, à ce que l'on a négligé l'action du pôle supérieur du fil : or, la distance du pôle inférieur du fil d'acier au centre de l'aiguille est de 16 pouces, et la distance du pôle supérieur au centre de cette même aiguille est à peu près $\sqrt{(16^2+23^2)}$; de sorte que l'action du pôle inférieur est à celle du pôle supérieur à peu près :: 100:19. Il résulte de là que les oscillations de l'aiguille étant produites par l'action de ces deux pôles qui agissent en sens contraire, le carré des oscillations, que produirait l'action seule du pôle inférieur du fil aimanté, se trouve diminué de $\frac{19}{100}$ par l'action opposée de la partie supérieure du même fil; ainsi le nombre 64 que l'on a trouvé n'est que l'excès de la véritable valeur de l'action seule de la partie inférieure du fil sur les $\frac{19}{100}$ du nombre qui la représente. En effectuant ce calcul, on trouve que cette véritable valeur est 79; alors on a

Distance.	Intensité de la force.
4 pouces.................	1456.
8 pouces.................	331.
16 pouces................	79.

Ces trois nombres sont à peu près en raison inverse du carré des distances. Ainsi il est bien démontré que l'action attractive du fluide magnétique est bien en raison inverse du carré de la distance. On peut démontrer de la même manière que l'action répulsive suit le même rapport.

176. La deuxième méthode pour déterminer la loi des attractions et répulsions magnétiques exige l'emploi de la balance magnétique déja décrite fig. 77 et 78, et pour la construction de laquelle nous allons encore ajouter quelques détails. On prend une boîte carrée de 3 pieds de côté et de 18 pouces de hauteur, dont les planches sont jointes par des chevilles de bois. A 9 pouces au-dessus du fond est placé un cercle horizontal de bois ou de cuivre, de 2 pieds 10 pouces de diamètre, divisé en degrés. Sur la boîte est placée une traverse AB, qui porte à son milieu une tige creuse *cd*, de 30 pouces de longueur, terminée en *d* par un micromètre de torsion ; la pince de ce micromètre saisit l'extrémité supérieure d'un fil de cuivre jaune, à l'autre extrémité duquel est adapté un anneau de cuivre destiné à porter l'aiguille d'acier.

Avant de commencer l'expérience, on voit si, lorsque la torsion du fil est nulle, l'aiguille aimantée se place naturellement dans le méridien magnétique ; c'est ce dont on s'assure en substituant à cette aiguille une autre aiguille de cuivre de même dimension que l'autre, qui reste dans le plan du méridien magnétique, en vertu de la force de torsion du fil. On place la boîte de manière que la direction du méridien magnétique communique aux divisions zéro et 180 du cercle horizontal. Voici les résultats que Coulomb a obtenus dans une de ses expériences :

Ayant aimanté un fil d'acier de 24 pouces de long et d'une ligne et demie de diamètre, il le suspendit horizontalement dans la balance, et chercha d'abord la force en vertu de laquelle la terre le ramenait dans le méridien. Il trouva qu'en tordant le fil de suspension de deux circonférences moins 20 degrés, l'aiguille s'arrêtait à 20 degrés du méridien magnétique, de sorte que pour les angles de 20 à 24 degrés, dont les sinus sont à peu près proportionnels aux arcs, il fallait, pour éloigner l'aiguille d'un degré de son méridien magnétique, une force de torsion à peu près égale à 35 degrés. Il plaça ensuite verticalement dans le méridien magnétique un autre fil aimanté, ayant les mêmes dimensions, à 11 pouces 2 lignes du centre de suspension de la première aiguille, de manière que l'extrémité boréale de ce fil se trouvât à environ 1 pouce au-dessous du niveau de l'extrémité boréale de l'aiguille suspendue. L'aiguille horizontale fut chassée du méridien magnétique, et ne s'arrêta que lorsque la force de répulsion des pôles opposés fut en équilibre avec la force directrice du globe. Ayant tordu le fil de suspension, il obtint les résultats suivants :

1er Essai. L'aiguille horizontale ayant été chassée, s'est arrêtée à 24 degrés du méridien magnétique, sans qu'on tordît le fil.

2e Essai. Pour ramener l'aiguille à 17 degrés, il tordit le fil de suspension de 3 circonférences.

3e Essai. Pour la ramener à 12 degrés, il fut obligé de tordre de 8 circonférences; or, lorsque l'aiguille était sollicitée seulement par l'action du magnétisme terrestre, elle était maintenue à 20 degrés de son méridien par une force de torsion égale à 2 circonférences moins 20 degrés. Ainsi, dans le cas où l'aiguille formait un angle de 20 degrés avec son méridien, la force qui la sollicitait était de 700 degrés. Mais comme dans le premier essai elle s'est arrêtée à 24 degrés, elle y a été ramenée par une force de 849 degrés; en outre la répulsion des aiguilles avait tordu le fil de suspension de 24

degrés, il en résulte que la répulsion totale était de 864°. En raisonnant de même, il trouva que, dans le second essai, l'action des deux pôles de l'aiguille était mesurée par 1692, et dans le troisième essai par 3312 degrés. Ainsi, pour les distances 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes étaient comme 864, 1692, 3312, ou bien comme les nombres $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, c'est-à-dire en raison inverse du carré des distances; il est donc bien démontré que les attractions et répulsions magnétiques suivent la loi qui régit les attractions planétaires.

CHAPITRE IV.

SUR LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

§ Ier. *Méthode du contact successif, de celles de Duhamel et d'Æpinus.*

177. Nous avons vu combien il était important d'aimanter, d'une manière régulière, une aiguille d'acier destinée à des recherches sur le magnétisme terrestre, et de lui donner en même temps toute la quantité de magnétisme qu'elle peut posséder. Nous allons exposer actuellement les divers procédés à l'aide desquels on parvient à remplir ces deux conditions.

Pour aimanter un barreau d'acier, nous nous sommes bornés précédemment à frotter, dans le même sens, ce barreau dans toute sa longueur, et à plusieurs reprises, sur le même pôle d'un aimant; cette méthode, qui est celle du contact successif, ne présente aucun inconvénient quand le barreau est court et que l'aimant est puissant; mais il n'en est plus de même lorsqu'il est très-long et fortement trempé, car il peut arriver que l'aimantation ne s'étende pas régulièrement jusqu'à l'extrémité opposée, et qu'il se produise des points conséquents, dont on ne saurait trop se garantir dans la construction des aiguilles aimantées.

Knight, en 1745, a fait connaître un perfectionnement dans le mode d'aimantation par simple contact. Ayant placé bout à bout, par les pôles de nom contraire, deux barreaux fortement aimantés, il posait dessus, dans le sens de leur longueur, un petit barreau

d'acier trempé cerise clair, de manière que son milieu correspondait aux points de jonction des deux barreaux; puis il séparait ceux-ci en les faisant glisser dans un sens opposé jusqu'aux extrémités du petit barreau, qui se trouvait avoir acquis un magnétisme plus fort que celui qu'on lui aurait communiqué par le moyen alors en usage. Il est facile de se rendre compte de l'effet produit.

Chaque aimant agissant sur la même moitié du petit barreau, la décomposition du magnétisme est favorisée par l'action simultanée des deux pôles opposés, qui attirent chacun l'un des magnétismes, et repoussent l'autre du côté opposé, tandis que dans le contact successif le même aimant agit seul, sur toute la longueur, pour y développer les deux magnétismes; ce qui doit produire un effet moindre. Cette méthode sert à aimanter à saturation seulement des barreaux courts et peu épais.

178. Peu de temps après cette découverte, Duhamel et Antheaume indiquèrent la méthode suivante d'aimantation : on place, parallèlement l'un à l'autre, deux barreaux AB et A'B' (fig. 79), joints à leurs deux extrémités par deux petits parallélipipèdes de fer doux F et F'; puis l'on prend deux barreaux aimantés *ab* et *a'b'*, que l'on incline de 25 à 30° sur leur direction, en les posant d'abord au milieu de l'un d'eux, les pôles inverses en regard, et on les fait glisser un certain nombre de fois en sens contraire, jusqu'à l'extrémité du barreau. On fait la même opération sur l'autre.

L'application des petits morceaux de fer doux à l'extrémité des barreaux que l'on aimante, est un perfectionnement important; en effet, dès que ces barreaux ont acquis un certain degré de magnétisme, les parallélipipèdes de fer doux s'aimantent par influence, et réagissent ensuite sur les barreaux pour augmenter leur magnétisme.

En substituant deux aimants aux barreaux de fer doux, on devait encore accroître le développement du

magnétisme : c'est ce qu'a fait Æpinus; néanmoins la méthode de Duhamel est excellente pour aimanter les aiguilles de boussole et les lames qui n'ont que quelques millimètres d'épaisseur.

§ II. *Méthode de la double touche.*

179. Mitchell et Canton, en Angleterre, se sont occupés, à la même époque, de l'aimantation. Le premier a imaginé un procédé qu'il a appelé *la double touche.* Il prit deux barreaux fortement aimantés, liés parallèlement entre eux, les pôles inverses en regard, et à une distance de 7 à 8 millimètres l'un de l'autre. Après avoir placé en contact plusieurs barreaux égaux, à la suite les uns des autres, sur une même ligne droite, il fit glisser le double barreau, à angles droits, par une de ses extrémités, tout le long de cette ligne; les barreaux intermédiaires acquirent une grande force magnétique, mais non un maximum.

Si l'on analyse ce procédé, on voit que les divers barreaux réagissent les uns sur les autres; mais comme le magnétisme ne s'y développpe pas librement, en raison de la force coercitive de l'acier, il faut nécessairement les soumettre à la friction des aimants glissants. Les barreaux intermédiaires doivent acquérir le plus fort magnétisme, par cela même qu'ils sont soumis à l'action par influence des barreaux extrêmes. Sous ce rapport, les barreaux de fer doux présentent plus d'avantage que les barreaux d'acier; sous un autre, le procédé de Mitchell l'emporte sur celui de Duhamel : c'est l'emploi de deux barreaux aimantés parallèles, maintenus constamment à une même distance, et agissant en même temps par leurs deux pôles contraires sur tous les points du barreau. Pour se rendre compte des effets produits, soient A B et B'A' (fig. 80) deux barreaux aimantés placés verticalement sur un autre barreau A″ B″, qu'il s'agit d'aimanter. La distance *a b* reste constante pendant qu'on fait glisser les deux premiers sur A″ B″. Considé-

rons une molécule *m* de ce barreau, située entre les deux pôles B et A, qui tendront à décomposer son magnétisme naturel.

Le faisceau AB agira plus efficacement par son magnétisme austral que par son magnétisme boréal, qui est plus éloigné; il en résultera que l'action totale de AB aura, pour résultante australe, une force dirigée suivant *mp;* de même le barreau A′B′ agira plus efficacement par son magnétisme boréal que par son magnétisme austral, et la résultante de l'action boréale de la molécule *m* aura une direction *m′p′*. Si l'on représente l'intensité de ces forces par *ms*, *ms′*, et qu'on décompose chacune d'elles en deux autres, l'une dans le sens de A″ B″ et l'autre perpendiculairement à cette direction, les deux forces *m s*, *m s′*, seront remplacées par quatre autres, *mt*, *mf*, *mt′*, *mf′*. Les deux forces longitudinales *mt* et *mt′* sont les seules qui concourent à la décomposition du magnétisme dans le sens du barreau; leur effet sera d'attirer, l'une le magnétisme boréal dans un sens, et l'autre le magnétisme austral dans une direction opposée, c'est-à-dire de décomposer le fluide magnétique naturel, et d'opérer par conséquent l'aimantation du barreau A″ B″ de la manière la plus efficace.

Si l'on considère maintenant une molécule située en dehors de l'intervalle qui sépare les deux barreaux, on trouve que l'action des forces longitudinales se contrarie au lieu de conspirer, et que l'action du pôle le plus voisin l'emporte sur l'autre, en raison de sa proximité; cette décomposition, qui est produite par la différence des forces, sera toujours plus faible que celle qui provient de leur somme. On voit donc que ce mode de friction, répété plusieurs fois d'un bout de la barre à l'autre, doit augmenter continuellement son magnétisme jusqu'à une certaine limite, qui est le point de saturation.

180. Pour être assuré que le développement du magnétisme est le même, au signe près, dans chacune des moitiés, il faut avoir l'attention d'appliquer le double barreau au centre de celui que l'on veut aimanter, et de

faire, sur chacune des deux moitiés, un nombre égal de frictions. Quand les barreaux sont revenus au centre, on les enlève perpendiculairement, pour ne pas changer l'effet précédemment produit. Æpinus a fait une modification heureuse au procédé de la double touche; au lieu de maintenir les deux barreaux glissant toujours parallèlement l'un à l'autre, il les a inclinés en sens contraire, comme Duhamel l'avait fait; les résultantes longitudinales deviennent alors plus considérables, parce que les actions agissent plus obliquement sur la surface du barreau. Cette innovation affaiblit, à la vérité, l'action propre de chaque barreau glissant, qui n'a plus qu'une ligne de contact avec le barreau, en raison de l'inclinaison. L'expérience prouve cependant que jusqu'à une certaine limite d'inclinaison, on trouve un avantage à se servir de barreaux inclinés. Æpinus a trouvé qu'une inclinaison de 15 ou 20 degrés donne sensiblement le maximum d'effets; en y joignant, comme il l'a fait, l'emploi des barreaux de fer doux ou des aimants, on a un procédé qui a de l'avantage sur les autres, de pouvoir aimanter fortement de gros barreaux avec des barreaux faibles en magnétisme.

Cette méthode a l'inconvénient de ne pas produire un développement égal de magnétisme dans chacune des moitiés du barreau, et de faire naître plus facilement des points conséquents dans des barreaux d'une certaine longueur que la méthode de Duhamel; aussi ne doit-on pas aimanter par ce procédé des aiguilles de boussoles; on ne s'en sert ordinairement que pour les gros barreaux, auxquels on veut donner un fort degré de magnétisme, sans qu'il soit nécessaire d'avoir une distribution égale de magnétisme.

§ III. *Procédé de Coulomb.*

181. Coulomb, mettant à profit les avantages que présentent les méthodes que nous venons d'exposer, a

adopté les dispositions suivantes, qui jusqu'ici n'ont éprouvé aucun changement.

Les barreaux fixes dont il a fait usage sont des faisceaux composés chacun de dix barreaux d'acier trempé cerise clair, de 5 à 6 décimètres de longueur, 15 millimètres de largeur et 5 d'épaisseur. Après les avoir aimantés autant que possible, il les réunit par leurs pôles de même nom, en en formant deux couches de cinq barreaux chacune, séparées par de petits parallélipipèdes rectangles de fer très-doux, qui sont un peu en saillie au-delà de leurs extrémités (fig. 82).

M. Biot a trouvé qu'il valait mieux substituer à ces parallélipipèdes des lames de fer doux, qui se réunissent à l'extrémité des aimants de manière à former une pyramide tronquée (fig. 81). Les barreaux glissants sont formés comme les barreaux fixes; mais au lieu de dix barreaux partiels, on en prend quatre, ayant chacun 400 millimètres de longueur, 5 d'épaisseur et 15 de largeur. On les réunit ensuite, deux sur la largeur et deux sur l'épaisseur, en les séparant, comme ci-dessus, par des bandes de fer doux. Quant à la qualité de l'acier, peu importe, puisque toutes les espèces connues prennent à peu près le même degré de magnétisme. Pour aimanter un barreau, on commence par placer les gros faisceaux (fig. 81 bis et 81 ter) sur une même ligne droite, les pôles inverses en regard, à une distance un peu moindre que la longueur du barreau; puis on applique, sur le pied de chacune des armures, un des bouts de ce barreau, de manière que le contact ait lieu sur une longueur de 4 ou 5 millimètres. On pose ensuite les deux faisceaux glissants au milieu du barreau, en les inclinant de 20 à 30 degrés sur sa surface, et en les faisant glisser suivant la méthode de Duhamel ou d'Æpinus. Si l'on emploie la dernière, il faut placer entre les deux barreaux un petit morceau de bois pour les maintenir à une distance constante. Quand les barreaux partiels dont se composent les faisceaux n'ont pas été aimantés à saturation, on se sert des barreaux nouvellement aimantés,

qui possèdent un magnétisme plus fort, pour former d'autres faisceaux.

182. Si l'on veut produire de grands effets, les faisceaux doivent être composés de plus de quatre barreaux partiels ; dans ce cas, on les dispose en retraite de 10 en 10 millimètres, comme l'indique la figure 83. Cette méthode est fondée sur la distribution du magnétisme dans les aimants, qui est telle que le plus grand développement du magnétisme a lieu vers les extrémités ; il en résulte que chaque étage tend à maintenir, dans l'étage inférieur, la séparation du magnétisme.

Nous devons faire remarquer que toutes les dispositions adoptées par Coulomb sont le résultat d'expériences très-précises, dans lesquelles il a déterminé rigoureusement, dans chaque mode d'aimantation, le degré de force des barreaux.

On obtient de grands avantages, lorsqu'on aimante un barreau, en le maintenant, pendant cette opération, à la température rouge, et lui faisant éprouver ensuite un refroidissement brusque, pendant qu'il se trouve sous l'influence des forces magnétiques.

§ IV. *Des armures ou armatures.*

183. Nous avons vu que lorsque l'un des pôles d'un aimant est en contact avec l'une des extrémités d'un barreau d'acier, il y développe peu à peu un magnétisme de nom contraire au sien, lequel réagit à son tour sur le magnétisme naturel de l'aimant pour opérer sa décomposition. Ce nouvel accroissement réagit de nouveau sur le barreau, et ainsi de suite jusqu'à une certaine limite, qui est déterminée par l'état de saturation de l'aimant et du barreau, et la constitution de l'acier. Cette propriété a été mise à profit pour augmenter la force des aimants naturels ou artificiels.

Si à l'un des pôles d'un aimant on applique un morceau de fer doux, auquel est attaché un plateau de balance, dans lequel on met successivement différents

poids, jusqu'à ce qu'on ne puisse plus ajouter une nouvelle charge sans séparer le fer doux de l'aimant, on trouve que le lendemain et jours suivants on peut augmenter la charge sans opérer la séparation ; mais si au bout d'un certain temps on détache forcément le fer doux, l'aimant n'est plus capable de soutenir toute la charge qu'il portait avant. Cet effet est facile à expliquer : l'aimant sous l'influence du fer avait acquis un excès d'énergie que sa force coercitive ne lui permet pas de garder ; abandonné à lui-même, il reprend le degré de force qui est propre à sa nature, c'est-à-dire qu'il rentre dans son état de saturation naturel.

Cela posé, considérons un aimant de forme carrée AA', BB (fig. 84), dont les pôles A et B sont de signe contraire. Si l'on applique au pôle A un morceau de fer doux *aa bb*, d'une certaine épaisseur, il y aura décomposition de magnétisme naturel dans le fer doux, attraction de magnétisme boréal en *bb*, et répulsion de magnétisme austral en *aa*, ou du moins des effets qui paraissent tels. Plaçons un morceau de fer doux, *a'a' b'b'*, semblable à l'autre pôle, il s'y produira des effets semblables de décomposition. D'après l'expérience précédente, au bout d'un certain temps, chaque pôle aura acquis un excès d'énergie, et par suite l'aimant entier sera capable de soutenir un poids plus considérable qu'avant. Ces appendices en fer doux, que l'on applique contre les aimants aux endroits où les pôles sont situés, sont appelés *armatures* ou *armures de l'aimant*, et les parties extrêmes *a a*, *b'b'* *les pieds de l'armure*. Leur épaisseur ne peut être déterminée que par l'expérience, attendu qu'elle varie en raison de la nature des aimants.

Les armures ont encore l'avantage de concentrer en quelques points toute l'action de l'extrémité d'un barreau qui a une certaine longueur. Supposons un aimant AB (fig. 85), placé en présence d'un petit barreau *ab*, qu'il s'agit d'aimanter; il est évident que tous les points de BB agiront plus ou moins obliquement sur le barreau, et auront moins d'influence pour décomposer son magné-

tisme naturel, que si ces points formaient une ligne de peu d'étendue ; de plus, l'action de A A, quoique plus faible que l'autre en raison de la distance, se fera sentir également sur *ab* pour contrarier celle de B B. On évite ces deux inconvénients en disposant des armatures, comme l'indique la fig. 84, et plaçant le petit barreau dans le prolongement d'un des pieds; d'une part, l'action du pôle est concentrée dans le pied de l'armure, et de l'autre, l'action du pôle boréal agit plus obliquement que dans les cas où les forces extrêmes de l'aimant sont parallèles. On parvient, par ce moyen, à donner à la petite aiguille un degré de magnétisme plus fort qu'en employant un aimant non armé. Les faits précédents indiquent que si l'on veut conserver à un aimant naturel ou artificiel toute sa force, il faut mettre en communication les deux pôles avec un parallélipipède de fer doux. Cette armature est surtout nécessaire quand il s'agit de conserver, dans nos climats, le magnétisme à un barreau vertical dont le pôle boréal est en bas; sans cela l'action du magnétisme terrestre diminuerait proportionnellement sa polarité. Pour faciliter l'application de l'armure, on donne au barreau la forme d'un fer à cheval (fig. 85 bis).

Dans un aimant artificiel, rien n'est plus facile que de placer l'armature, puisque l'on sait où sont ses pôles; mais il n'en est pas de même dans un aimant naturel, où sa position est inconnue. Il faut commencer d'abord par la déterminer ; on scie ensuite les deux côtés où ils se trouvent, perpendiculairement à l'axe polaire, de manière à conserver la plus grande longueur possible. On polit les faces, puis on leur applique les armures. La figure 86 représente un aimant naturel avec son armure, dans laquelle on distingue la jambe AB, les pieds D C, les ailes L L, deux bandes de cuivre EF, qui sont destinées à serrer fortement les armatures, au moyen d'une vis de cuivre qui en traverse les extrémités. La pièce A'B'C'D', qui est en fer doux et flexible, se nomme le *portant*, et sert à suspendre les corps que l'aimant peut soutenir. On est dans l'usage de lui

donner 11 millimètres de longueur de plus que la distance qui se trouve entre les faces extérieures C et D des pieds de l'armure. La surface supérieure DC du portant doit être polie et avoir des angles aigus.

Pour déterminer l'épaisseur de la jambe, on prend dans le même morceau de fer quatre pièces propres à faire quatre armatures, et l'on essaie le poids que porte l'aimant, quand on l'établit sur les deux premières. Ce poids augmente d'abord à mesure que l'on diminue l'épaisseur de la jambe en dehors; mais il diminue ensuite, et l'on s'en tient aux dimensions que ces deux lames avaient dans l'épreuve qui a précédé la dernière. Alors on donne aux deux autres pièces les dimensions déterminées.

§ V. *Procédé pour aimanter à saturation des barreaux d'acier par l'action de la terre.*

184. Gilbert, dès 1600, a découvert que le fer devient magnétique quand on le frappe à coups de marteau dans la direction nord et sud du méridien magnétique.

M. Scoresby ayant observé que l'on détruit la polarité en frappant le fer dans le plan de l'équateur magnétique, il en résulte que l'aimantation du fer par le choc dépend de la position que l'on donne à la barre. M. Scoresby, après avoir déterminé les lois principales qui régissent le développement et la destruction du magnétisme dans le fer, quand on le frappe, qu'on le lime ou qu'on le tord, a cherché à appliquer ces lois à la construction d'aimants, sans l'emploi d'aucune substance possédant déja le magnétisme (1).

Pour apprécier les effets magnétiques produits par la percussion sur diverses espèces de fer, M. Scoresby a employé deux méthodes, l'une qui consiste à évaluer le poids de fer que peut supporter le corps aimanté,

(1) Philos. Trans. 1822, 2e partie, p. 241.

l'autre, à présenter une aiguille aimantée, dont on mesure l'étendue de la déviation : ces deux méthodes ne peuvent donner que des différences. On peut voir, dans le Mémoire de M. Scoresby, le dispositif de ses expériences

Il employa à cet effet trois marteaux : le premier pesant 22 onces, le deuxième 12 onces, et le troisième 2 onces ½ (1).

Il soumit d'abord à l'expérience une barre cylindrique d'acier doux placée dans une position verticale, et reposant sur une pièce de métal quelconque. La barre avait les dimensions suivantes : longueur, 6 pouces ½ ; diamètre, ¼ de pouce ; poids, 592.

NOMBRE DE COUPS		POIDS suspendus.	DISTANCES de l'aiguille à la barre.	DÉVIATION.	MARTEAU.
à chaque expérience.	TOTAL.				
1	1	2	3	8	2eme
1	2	—		10	
5	7	4		12	
10	17	6 1/2		12 1/2	
5	22	6 1/2		12 1/2	

Ayant placé la barre sur une grosse pierre, l'effet fut le même ; mais il n'en fut plus ainsi, comme on devait s'y attendre, en appuyant la barre, par son extrémité inférieure, sur l'extrémité supérieure d'une large baguette de fer ou d'acier doux, et frappant également celle-ci. Les expériences suivantes prouvent qu'effectivement ce mode d'expérimentation augmente considérablement l'intensité magnétique du barreau.

(1) Il n'a pas jugé convenable de tenir compte du nombre de coups frappés, parce que, ayant été donnés par la main, ils n'ont pu être d'égale intensité.

NOMBRE DE COUPS à chaque essai.	NOMBRE DE COUPS TOTAL.	POIDS suspendus.	DISTANCE de l'aiguille à la barre.	DÉVIATION.	N° DU MARTEAU.
1	1	6 gr. 1/2	3 pouc.	13	2e
1	2	14	»	16	»
1	3	»	»	18	»
4	7	37	»	21	»
5	12	45	»	25	»
10	22	88	»	27	»
20	42	88	»	30	»
30	72	»	»	31	»
10	82	»	»	31 1/2	»
En substituant un marteau plus fort, l'intensité magnétique devint plus considérable encore.					
3	85	»	»	33	1er
5	90	130	»	34	»
3	93	»	»	30	»
En renversant les pôles on a eu					
1	»	0	3	5	2me
1	2	0	0	2	

Voici les conséquences générales que nous tirons de toutes ces observations :

1° Une barre cylindrique d'acier doux, longue de 6 $\frac{1}{2}$ pouces et pesant 592 grains, portait, après qu'on l'eût frappée à coups de marteau sur l'étain et la pierre, 6 $\frac{1}{2}$ grains.

2° La même barre, frappée verticalement sur une baguette de fer également suspendue, après deux coups, portait avec son extrémité inférieure, qui était le pôle nord, 88 grains; et en se servant d'un marteau plus fort, elle recevait un accroissement considérable de puissance produisant, sur la boussole éloignée de 3 pouces, une déviation de 34 degrés; en la frappant

davantage, on trouva que l'effet diminuait plutôt qu'il n'augmentait. En renversant la barre de manière que le pôle austral fût en haut, le magnétisme fut presque détruit par un seul coup; tandis que deux coups changèrent les pôles. En frappant l'extrémité de la barre dans le plan de l'équateur magnétique, la polarité disparut aussi; mais l'effet ne fut complétement produit que lorsqu'on eut donné plusieurs coups.

185. M. Scoresby remarqua que lorsque la baguette de fer avait été d'abord frappée dans une position verticale, on obtenait un accroissement d'effet magnétique sur la barre; un seul coup rendait alors la barre capable de supporter environ 20 grains; et quand avec le marteau cette extrémité fut façonnée en forme de coupe, de manière à être facilement rompue, un seul coup suffisait pour rendre la barre capable de supporter entre 30 et 40 grains. Dix coups produisirent l'effet le plus fort qu'on eût obtenu dans ces expériences, car la barre supportait d'une manière ferme un clou de 188 grains.

Pour déterminer l'effet de la percussion sur des aimants convenablement trempés, il s'est servi d'une barre plate d'une trempe bleue, de $7\frac{7}{10}$ pouces de longueur, $\frac{1}{2}$ pouce de large et $\frac{1}{7}$ d'épaisseur, et pesant 1170 grains.

L'aimant suspendu verticalement sur une baguette de fer, l'extrémité sud en haut, lui a donné :

NOMBRE DE COUPS à chaque expérience.	NOMBRE DE COUPS total.	EXTRÉMITÉ de l'aimant dirigé en haut.	DISTANCE de l'aiguille.	DÉVIATION.
0	0		8 pouces.	45
5	5	Sud	»	37
5	10		»	32
10	20		»	30
10	30		»	28
10	40		»	27
20	60		»	26
20	80		»	25
20	100		»	25
Extrémité nord en haut.				
0	0		8	25
1	1	Nord	»	20
20	11		»	16
20	30		»	14
Barre rendue de nouveau magnétique et martelée sur un morceau d'étain.				
0	0		8	50
10	10	Sud	»	37
10	20		»	33
10	30	Nord	»	27
10	40		»	26
20	60		»	24
20	80		»	24
20	100	Sud	»	24
20	120	Nord	»	23
20	140		»	23
20	160	Sud	»	23 1/2

M. Scoresby a trouvé, par d'autres expériences, que le magnétisme augmentait avec des barres plus longues.

Un fort aimant, convenablement trempé, perdit une portion de son magnétisme dans toutes les positions où on le frappait ; mais la perte était encore plus rapide quand le pôle austral était en haut.

186. M. Scoresby a appliqué à la formation des aimants les propriétés magnétiques qu'il a reconnues dans l'acier soumis à la percussion. Il prit deux barres d'acier doux, longues de 30 pouces et larges d'un pouce; six autres barres plates d'acier doux, longues de 8 pouces et larges d'un demi-pouce; et une large barre de fer doux : toutes ces barres n'avaient aucune trace d'aimantation.

La large barre de fer fut d'abord frappée dans une position verticale : on la posa immédiatement, sans changer sa direction, sur les barres d'acier qu'on frappait : elles furent aussi frappées l'une sur l'autre. Chacune des petites barres, suspendue aussi verticalement au sommet d'une des larges barres d'acier, fut frappée successivement, et en quelques minutes elles avaient acquis un pouvoir considérable de suspension. Deux des plus petites barres, unies par deux petits parallélipipèdes de fer doux, furent frottées avec les quatre autres barres, de la manière indiquée par Canton : elles furent remplacées par deux autres, et celles-ci par les deux dernières. Après avoir ainsi traité chaque paire de barres pendant un certain temps et en les changeant, après les avoir frottées pendant une minute environ, on trouva à la fin que toutes les barres étaient aimantées à saturation.

CHAPITRE V.

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME LIBRE DANS LES FILS D'ACIER AIMANTÉS.

§ Ier. *Distribution du magnétisme libre dans les fils d'acier aimantés à saturation par la méthode de la double touche.*

187. Dans un aimant de plusieurs décimètres de longueur et de quelques millimètres de diamètre, si l'on essaie de faire supporter en divers points des poids en fer, on trouve que ces poids vont en augmentant, à partir des extrémités jusqu'à une distance de 8 ou 10 millimètres, et qu'ils diminuent ensuite rapidement, de telle sorte que les points qui sont situés au-delà de 6 ou 8 centimètres ne supportent plus aucun poids. On reconnaît, de plus, que les points situés à la même distance des extrémités supportent des poids égaux. On voit donc que la quantité de magnétisme libre, depuis certains points proches des extrémités, va en diminuant rapidement jusqu'au centre de l'aiguille.

188. Ce procédé a été le seul employé pendant longtemps pour déterminer la distribution du magnétisme libre dans les barreaux d'acier. Coulomb en a imaginé un autre, susceptible d'une assez grande précision, lequel exige l'emploi de la balance magnétique. On place à l'extrémité du fil de suspension un fil d'acier aimanté à saturation, et l'on dispose l'appareil pour que le fil n'ait pas de torsion quand l'aiguille se trouve dans le méridien magnétique. Dans le même plan (fig. 87), on place une règle

verticale R R de bois, de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur, de manière que l'une des extrémités de l'aiguille, l'extrémité A par exemple, vienne s'y appliquer lorsque le fil est sans torsion; de l'autre côté de la règle on fait descendre verticalement, dans une rainure faite sur la surface, un second fil d'acier semblable au premier et aimanté de même, de sorte que le pôle A′ corresponde au pôle A.

L'aiguille mobile est d'abord chassée, mais on la ramène au contact avec la surface de la règle en tordant convenablement le fil de suspension. Voici ce qui se passe : les deux fils se croisant à angle droit, tous les points qui se trouvent à une certaine distance du point de croisement ne contribuent que très-peu à la répulsion, en raison de l'obliquité de leur direction : il en résulte que les quantités de magnétisme qui concourent à cette répulsion sont celles qui se trouvent de part et d'autre du point de croisement sur les deux aiguilles, jusqu'à une distance de 4 ou 5 millimètres; mais le point qui est au croisement est celui qui agit avec le plus d'efficacité. Si donc l'on présente successivement tous les points du fil vertical aux mêmes points du fil *ab*, dont l'action reste constante, les forces de torsion, qu'il est nécessaire d'employer pour maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, serviront à mesurer d'une manière rapprochée l'intensité du magnétisme libre du point du fil vertical qui se trouve au croisement. C'est par ce moyen que Coulomb est parvenu à reconnaître que le magnétisme libre est réuni presque en entier sur les huit premiers centimètres du fil, à partir des extrémités. Si l'on eût mis en présence les pôles de même nom, la mesure du magnétisme au point de croisement aurait été représentée par la force de torsion nécessaire pour faire sortir le fil mobile du méridien magnétique.

On est dans l'usage de représenter géométriquement les quantités de magnétisme libre d'une aiguille par les ordonnées d'une courbe, dont les distances de chaque

point à l'une des extrémités sont les abscisses. On emploie aussi la méthode des oscillations pour trouver la distribution du magnétisme libre sur une aiguille ; il faut remplacer alors le fil de torsion par un fil de soie tel qu'il sort du cocon, et le fil d'acier aimanté mobile par une petite aiguille de boussole (fig. 90) ; dès l'instant que l'on dérange celle-ci de sa position naturelle d'équilibre, elle y revient par les actions combinées de la terre et du fil vertical. La première, comme on sait, est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations qu'elle exécute dans un temps donné, dans une minute par exemple, lorsqu'elle est soumise à l'action seule de la terre ; si l'on cherche ensuite le nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps lorsqu'elle est en présence de l'aiguille, on aura la mesure de l'action exercée par ce fil, en retranchant le résultat précédent du carré du nombre d'oscillations trouvé en dernier lieu ; la différence servira de mesure à la quantité de magnétisme libre du point du fil qui se trouve à la hauteur de l'aiguille mobile, parce que ce point agit plus directement dans le plan horizontal que les autres points qui sont situés au-dessus et au-dessous. Il est facile de voir, au surplus, que, dans chaque expérience, la partie du fil qui agit avec plus d'énergie exerce une force totale presque proportionnelle à celle du point le plus voisin, laquelle peut servir de mesure à la quantité de magnétisme libre qui s'y trouve. Cette méthode ne peut s'appliquer aux points extrêmes ou qui en sont à peu de distance, attendu qu'il n'existe pas au-delà de l'extrémité des points dont l'action devrait concourir à l'effet général : cela fait que l'action éprouvée par l'aiguille n'est pas la même que si le fil était prolongé. Pour parer à cet inconvénient, lorsque l'on fait osciller l'aiguille à l'extrémité du fil, il faut doubler le nombre qui représente le carré des oscillations, pour que le résultat soit comparable à ceux que l'aiguille donne quand elle oscille devant les autres points.

On emploie ordinairement des fils assez longs pour

que l'extrémité la plus éloignée n'exerce aucune action sensible sur la petite aiguille. Celle-ci doit être aimantée à saturation, pour que son magnétisme n'éprouve aucun changement par la réaction de celui du fil. Coulomb s'aperçut de cette cause d'erreur, lorsqu'il employait une petite aiguille de 2 lignes de longueur, placée à trois lignes de distance du fil; mais il s'en garantit en se servant d'une aiguille de 6 lignes de longueur, de 3 lignes de diamètre, et d'un fil aimanté, de 2 lignes de diamètre, de 27 pouces de longueur, et d'un poids de 865 grains le pied.

Expériences sur un fil d'acier de 27 pouces de longueur et de 2 lignes de diamètre.

1er Essai.	La petite aiguille, avant qu'on lui présente le fil d'acier, a fait une oscillation en 60".	
2e Essai.	L'extrémité *b'* du fil, placée au niveau de l'aiguille, a fait en 60".......	64 oscill.
3e Essai.	La même extrémité abaissée de 6 lig., l'aiguille a fait...........	58
4e Essai.	——abaissée de 12 lignes,.....	44
5e Essai.	——abaissée de 24 lignes,.....	18
6e Essai.	——abaissée de 36 lignes,.....	12 oscill.

7e Essai. L'extrémité *b'* abaissée de 4 pouces $\frac{1}{2}$, l'aiguille n'a plus fait qu'une ou deux oscillations en 60"; il en est de même jusqu'à ce que l'on ait abaissé l'extrémité *b'*, jusqu'à un peu plus de 22 pouces, c'est-à-dire jusqu'à 4 pouces $\frac{1}{2}$ de l'autre extrémité : alors l'aiguille a changé de position.

Un fil de 10 pouces de longueur et de même diamètre que le précédent a donné les mêmes résultats.

Avec un fil de 5 pouces et de même diamètre, l'on a trouvé encore aux extrémités, et même jusqu'à 5 ou 6 lignes, à très-peu près les mêmes degrés d'action qu'à l'extrémité des deux précédentes aiguilles.

Coulomb a construit la courbe des intensités (figure 88), en prenant pour abscisses les distances aux extrémités de l'aiguille, et pour ordonnées les carrés du nombre des oscillations, qui représentent les intensités des actions magnétiques en chaque point. On voit que les ordonnées de cette courbe décroissent rapidement et sont à peu près nulles vers le 5e pouce; depuis ce point, la courbe se confond avec l'axe jusqu'au 22e pouce; et sur les 5 pouces de l'autre extrémité, elles suivent à peu près la même loi, mais dans un sens contraire. Vers l'extrémité de l'aiguille en *o*, il a doublé le nombre qui représente le carré des oscillations.

Ce doublement, comme nous l'avons dit précédemment, ne donnerait la véritable valeur que dans le cas seulement où le fil étant prolongé, la distribution du magnétisme serait décroissante, à partir de l'extrémité, suivant une loi entièrement semblable à celle des intensités magnétiques du fil. Soient (fig. 89) *ab* le fil, *cc* la courbe des intensités, *ab'* son prolongement, et *c'c'* la courbe des intensités supposées. Dans le cas où celles-ci seraient décroissantes, il est bien évident que la répulsion opérée au point *a* aurait lieu, en vertu d'une force double de celle que l'on obtient directement, puisque tout serait symétrique de part et d'autre; mais il n'en serait plus de même quand la distribution du magnétisme serait croissante au lieu d'être décroissante : dans ce cas, les ordonnées de la courbe qui la représente seraient plus considérables que celles de l'autre. Le doublement doit donc donner un résultat un peu plus faible : c'est ce que M. Biot a fait voir aussi par le calcul; en outre, ce doublement ne doit avoir lieu que pour le point extrême, car, pour les autres, l'erreur serait d'autant plus grande que le point que l'on considère est plus éloigné.

189. La courbe des intensités étant exactement la même, quelle que soit la longueur des fils, pourvu qu'ils aient plus de 8 ou 9 pouces de longueur et ne faisant que se transporter vers les extrémités, on peut

en conclure que les moments de la force directrice de différentes aiguilles d'acier n'ayant pas la même longueur, mais de même nature et de même grosseur, doivent différer entre eux d'une quantité proportionnelle aux décroissements des longueurs. M. Biot, en cherchant la relation qui existe entre les abscisses et les ordonnées de la courbe des intensités, a reconnu qu'elle constituait une logarithmique. Coulomb a déterminé par le calcul la position du centre d'action de l'aiguille, ou, ce qui revient au même, le centre de gravité de la courbe des densités magnétiques (1) d'une aiguille de 12 pouces de long, et pesant 38 grains le pied; il a trouvé que la distance de ce point à l'extrémité la plus voisine était égale à 0,36 pouces.

Dans une aiguille de 18 pouces de long, ayant à peu près 2 lignes de diamètre et pesant 865 grains le pied, cette distance a été trouvée égale à 1,51 pouce. Les diamètres des deux fils étant entre eux :: les racines carrées des poids, ou comme $\sqrt{865} : \sqrt{38}$, :: 4,8 : 1,00, les distances des centres de gravité sont :: 1,510 : 0,36, :: 4,2 : 1; il s'ensuivrait que ces distances seraient comme les diamètres des aiguilles.

Puisque dans les aimants dont la longueur surpasse 6 ou 8 pouces, la courbe des intensités est la même et ne fait que se transporter vers les extrémités, en laissant vers le milieu un espace plus ou moins grand où l'intensité est à peu près nulle, il en résulte que tous les aimants de même forme ont leurs pôles à la même distance des extrémités, puisque les pôles ne sont autres que les centres de gravité des courbes des intensités magnétiques. Coulomb a trouvé par le calcul que, dans des aimants très-courts, les pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, et que cette valeur est une limite dont les pôles s'approchent à mesure que la longueur diminue.

---

(1) Mémoires de l'Acad. des scienc., 1789, p. 47.

Coulomb, qui avait remarqué que l'état magnétique de la petite aiguille avait varié d'un essai à l'autre, lui en substitua une autre comme nous l'avons dit plus haut, dont la résistance magnétique était plus grande, et qui avait 6 lignes de longueur et 3 de diamètre.

La distance du centre de gravité de la courbe des densités à l'extrémité la plus voisine s'est trouvée être de 1,3 pouce au lieu de 1,5 précédemment. Cet accroissement sensible indique que la densité des points placés proche le milieu de l'aiguille est un peu plus forte que celle qui est indiquée par la figure, ce qui provient de l'influence magnétique des points fortement aimantés du fil d'acier $a'b'$ sur l'état magnétique de l'aiguille ab.

§ II. *De la distribution du magnétisme libre dans les fils d'acier d'un très-petit diamètre.*

190. Les fils d'acier d'un très-petit diamètre ne prenant qu'un faible degré de magnétisme, on est obligé de modifier l'une des méthodes précédentes pour découvrir la distribution du magnétisme libre sur leur longueur. Cette question présentant de l'intérêt en raison du grand nombre de corps qui sont peu magnétiques, je crois devoir la traiter ici avec des développements convenables.

Pour former des fils d'acier d'un très-petit diamètre, il faut employer un procédé à peu près semblable à celui dont Wollaston a fait usage pour se procurer des fils de platine très-fins. On prend un moule en terre de fondeur, divisé dans son épaisseur en deux parties qui se superposent parfaitement; dans chacune de ces parties, on moule la moitié d'un cylindre, suivant l'axe duquel on place un fil d'acier d'un demi-millimètre ou d'un millimètre de diamètre. Le diamètre du cylindre creux dépend du rapport que l'on veut lui donner avec celui du fil. Si l'on place ensuite ce fil au milieu d'une des parties moulées et qu'on la recouvre par l'autre, il se trouve dans la direction de l'axe. Alors, coulant de l'argent en fusion, par une ouverture conique pratiquée

dans la partie supérieure du moule, on a un cylindre d'argent dont l'axe est un fil d'acier : on tire ensuite le tout à la filière. Si le rapport entre les deux diamètres est comme 1 : 20, et que le cylindre soit réduit à un fil d'un millimètre de diamètre, celui d'acier n'aura que $\frac{1}{20}$ de millimètre. Pour le dégager de l'argent dont il est entouré, on se sert de mercure, dont on élève convenablement la température. Cette opération exige de grandes précautions si l'on veut obtenir des fils d'acier intacts d'une certaine longueur. Ces fils, en sortant du mercure, possèdent assez de magnétisme pour que l'action terrestre les dirige dans le plan du méridien magnétique, quand ils sont suspendus à des fils de cocon.

J'ai cherché la loi du développement du magnétisme dans les fils, pour savoir si elle était la même que dans les aiguilles ordinaires: je me suis servi à cet effet de la balance magnétique.

Le fil possédant un très-faible degré de magnétisme, il faut prendre, pour fil de suspension, un fil très-fin de platine, dont la force de torsion soit très-faible.

On suspend, à l'extrémité de ce fil, le fil d'acier aimanté, dans lequel on veut découvrir la distribution du magnétisme, et qui est encore recouvert de son enveloppe d'argent, afin de pouvoir agir sur des fils de plusieurs décimètres de longueur; ce qu'on ne pourrait faire avec des fils d'acier simples de cette dimension, vu la difficulté de les maintenir dans une direction rectiligne.

Ensuite, comme l'a fait Coulomb, on dispose l'appareil pour que l'aiguille suspendue soit dans le plan du méridien magnétique quand le fil de platine est sans torsion. Sur la direction du même plan, on place une planchette en bois de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, et l'on dispose l'appareil comme précédemment; on présente ensuite, à tous les points de l'aiguille suspendue, le même pôle d'un fil aimanté vertical. Suivant le procédé de Coulomb, c'est l'une des extrémités de l'aiguille horizontale que l'on présente successivement

à tous les points du fil vertical : ici, c'est le contraire ; l'aiguille horizontale est d'abord chassée par la répulsion, mais on la ramène, par la torsion du fil de suspension, dans le plan du méridien magnétique.

L'aiguille soumise à l'expérience avait 128 mill. de longueur et $\frac{1}{75}$ de mill. de diamètre ; on obtint les résultats suivants :

DISTANCES à l'extrémité boréale en millimètres.	ANGLE DE TORSION pour ramener l'aiguille horizontale au contact.
0	60
5	35
10	22
15	13
20	9,2
25	4,6

Pour arriver à la détermination des valeurs qui expriment les quantités de magnétisme, il faut faire subir plusieurs transformations aux nombres de la seconde colonne.

Mettons le point de croisement en m (fig. 89) à une distance de l'extrémité moindre que 15 millimètres, et cherchons quelle doit être l'intensité du magnétisme en ce point : supposons, comme tout à l'heure, que l'aiguille soit prolongée au-delà de a, avec une distribution de magnétisme qui soit décroissante ; dans ce cas, un certain nombre de points de l'aiguille prolongée contribueront aussi à la répulsion, puisque cette répulsion en m a lieu en vertu des actions exercées par tous les points situés à droite et à gauche de m, jusqu'à une distance d'environ 12 ou 15 millimètres. On peut, dans notre supposition, déterminer rigoureusement l'action des points situés au-delà de a, qui concourraient à la répulsion. En effet, plaçons le point de croisement en m' à une distance $am' = am$, l'intensité des actions sera

la même en m' qu'en m, puisque la distribution du magnétisme est supposée semblable de chaque côté du point a; il n'y aura de différence que celle qui proviendra du point d'application de la force; mais il est très-facile de faire une correction pour rapporter les actions à un même point du barreau. Supprimons maintenant le prolongement du fil, et laissons toujours le point du croisement en m', il y aura encore une répulsion, qui sera due à l'action d'un certain nombre de points de l'aiguille ab; cette action sera précisément égale à celle qui manquait à la répulsion quand le point de croisement était en m, toujours à la différence près qui provient du point d'application de la force. Il résulte de là, qu'en supposant le fil prolongé au-delà de l'extrémité et la distribution du magnétisme décroissante, deux observations en m et m' suffiront pour déterminer l'intensité du magnétisme en m.

Soient donc $2l$ la longueur totale du fil, $am = am' = d$, g la distance du point m au centre de suspension, a l'angle de torsion nécessaire pour maintenir le contact en m, y la quantité angulaire qui manque à la répulsion pour représenter une quantité proportionnelle à l'intensité du magnétisme en m. Quand le point de croisement sera en m', l'angle de torsion nécessaire pour maintenir l'équilibre en ce point aura pour expression

$$(a+y)\left(\frac{g+2d}{g}\right),$$

puisque les actions en m et m' sont les mêmes, et que dans l'équilibre du levier les forces sont réciproquement proportionnelles aux bras de levier.

$$(a+y)\left(\frac{g+2d}{g}\right)$$

peut être mis sous la forme

$$a\left(\frac{g+2d}{g}\right)+y\left(\frac{g+2d}{g}\right).$$

Or, le premier terme est donné directement par l'expérience, quand le point de croisement est en m, et le second lorsqu'il est en m'. Représentons par y' la valeur de

$$y\left(\frac{g+2d}{g}\right),$$

on aura

$$y'=\left(\frac{g\quad y'}{g+2d}\right);$$

donc l'intensité du magnétisme en m aura pour expression

$$\frac{a+gy'}{g+2d}.$$

Mais les observations ne peuvent être comparables qu'autant que toutes les actions seront rapportées à un même point du levier, à son extrémité par exemple. Or, l'action magnétique en m étant représentée par

$$\frac{a+gy'}{g+2d},$$

en la rapportant au point a, l'expression de son énergie sera exprimée par

$$\frac{\{a(g+2d)+gy'\}(g+d)}{d(g+2d)}.$$

Nous avons supposé, dans tout ce que nous venons de dire, que si le fil ab était prolongé, les ordonnées qui représentent les intensités magnétiques de ses différents points, iraient en décroissant, tandis que pour avoir des résultats exacts, il faudrait que la distribution du magnétisme fût croissante. Mais l'erreur que l'on commet en faisant cette supposition est moindre que celle qui provient du doublement de l'intensité à l'extrémité, comme l'a fait Coulomb, puisque le nombre de points du fil supposé prolongé, qui contribuent à la répulsion,

va en diminuant à mesure que le point m s'éloigne du point a. Ainsi, plus le croisement sera éloigné de a, plus sera petite l'erreur que l'on commettra en déterminant, comme nous venons de le faire, l'intensité du magnétisme des points situés à une distance de l'extrémité moindre de 15 millimètres. Or, comme l'erreur qui provient du doublement est peu considérable, les autres le seront encore moins. L'accord qui existe entre les résultats de l'expérience et ceux du calcul concourt encore à faire négliger l'erreur que l'on commet en faisant la supposition dont nous avons parlé.

Appliquons, aux résultats que nous avons consignés dans le tableau précédent, les corrections ci-dessus.

DISTANCES à l'extrémité boréale en millimètres.	ANGLES DE TORSION pour ramener l'aiguille horizontale au contact, quand le point de croisement est en m.	ANGLES DE TORSION pour ramener l'aiguille au contact, quand le point de croisement est en m'.
0	60	60
5	35	30
10	22	15
15	13	8
20	9,2	0
25	4,6	0

Il s'agit maintenant d'examiner l'effet de la seconde cause, qui empêche que les résultats dont nous venons de parler soient comparables, à moins cependant d'y faire une correction convenable. Or, qu'avons-nous fait? Nous avons appliqué l'action constante de notre barreau vertical, successivement à différents points de l'aiguille horizontale ; c'est donc une même force qui a été appliquée tantôt à l'extrémité d'un bras de levier, tantôt à 5 millimètres de distance, à 10 millimètres, etc. Tous les résultats obtenus dans ces divers cas ne seront donc comparables qu'autant qu'on aura eu égard à cette différence d'action. Il faut pour cela rapporter toutes ces

actions à un même point de barreau, à son extrémité par exemple. Effectuons cette correction.

DISTANCES à l'extrémité boréale en millimètres.	ANGLES de torsion quand le point de de croisement est en m.	ANGLES de torsion pour maintenir le contact quand le point de croisement est en m'.	ANGLES de torsion pour maintenir le contact, quand le point de croisement est en m, et que les actions sont rapportées à l'extrémité.	INTENSITÉS magnétiques déduites de la formule, en supposant les actions rapportées à l'extrémité.
0	.. 60 ..	.... 60	...... 60	 120,0
5	.. 35 ..	..... 30	...... 38,0	 68,0
10	.. 22 ..	..... 15	...... 26,0	 41,0
15	.. 13 ..	..... 8	...... 16,4	 24,4
20	.. 9,2 ..	..... 0	...... 13,3	 13,3
25	.. 4,6 ..	..... 0	...... 7,6	 7,6

Puisque nous avons un moyen pratique de trouver par approximation, dans des aiguilles très-fines d'acier, l'intensité magnétique des points situés à moins de 15 millimètres des extrémités, cherchons si la formule que M. Biot a donnée pour représenter les intensités de magnétisme libre dans les barreaux ordinaires, comprend aussi les résultats consignés dans le tableau ci-dessus. Ce célèbre physicien a fait voir que, d'après les expériences de Coulomb, la loi des intensités magnétiques pouvait être représentée par l'équation logarithmique

$$y = A(\mu^x - \mu^{2l-x}),$$

dans laquelle $2l$ désigne la longueur totale du fil aimanté, x la distance rectiligne depuis l'extrémité australe jusqu'au point dont l'intensité magnétique est y. Quand l'aiguille sur laquelle on opère a une grande longueur, on peut négliger

$$\mu^{2l-x},$$

qui est ordinairement une fraction très-petite; alors l'équation des intensités devient

$$y = A\mu^x,$$

dans laquelle A et μ sont déterminés par deux observations. M. Biot a trouvé une telle concordance entre les résultats de l'expérience indiqués par Coulomb et ceux donnés par cette formule, que l'excès du calcul, ordinairement faible, est tantôt positif, tantôt négatif.

M. Biot a cherché principalement les intensités magnétiques des points situés à plus de 2 centimètres des extrémités, pour éviter les corrections; il pouvait agir ainsi, parce que le développement du magnétisme libre s'étendait dans les fils de Coulomb jusqu'à une distance de 6 ou 8 centimètres. Mais dans les fils très-fins d'acier, dont nous nous occupons, on n'a pas ce même avantage, attendu que le développement du magnétisme devient insensible au-delà de 3 centimètres. Il a donc fallu découvrir un moyen de trouver par approximation l'intensité magnétique des points situés à peu de distance des extrémités; c'est ce que nous avons tâché de faire.

Il reste maintenant à faire voir que ces intensités, telles que nous les avons obtenues, sont données par la formule de M. Biot. Si nous prouvons l'identité entre ces deux espèces de résultats, ce sera une preuve que la méthode pratique dont nous nous sommes servis peut être employée à déterminer par approximation les intensités magnétiques des points situés à peu de distance des extrémités.

Déterminons les constantes A et μ, au moyen du quatrième et du cinquième résultat, et prenons 5 millimètres pour unité de longueur, on aura

$$x = 4 \qquad y = 13{,}3$$
$$x = 5 \qquad y = 7{,}6.$$

En substituant successivement ces valeurs dans l'équation

$$y = \mathrm{A}\,\mu x,$$

on en déduira $\mathrm{A} = 126{,}6$ et $\mu = 0{,}57$; l'équation des intensités sera donc $y = 126{,}6 .\ 0{,}57^x$.

Faisant successivement, dans cette équation, $x=1$, $x=2$, $x=3$, on en déduira l'intensité magnétique que possèdent les points de l'aiguille qui se trouvent à 5, 10, 15 millimètres de l'extrémité boréale.

DISTANCE à l'extrémité boréale.	INTENSITÉ du magnétisme libre déterminée		DIFFÉRENCE.
	par l'observation.	par le calcul.	
0	120	126,6	+ 6,6
5	68,0	71,8	+ 3,3
10	41,0	40,93	+ 0,07
15	24,4	25,80	+ 1,4
20	13,3	13,3	0
25	7,6	7,6	0

On voit que les différences entre les intensités du magnétisme libre données par l'observation, et celles qui sont déduites de l'équation logarithmique, sont positives et vont en diminuant, à mesure que les points auxquels ces intensités appartiennent sont plus éloignés des extrémités. Ce résultat est entièrement conforme à ce que nous avons dit plus haut; la méthode pratique, dont nous nous sommes servis pour déterminer les intensités de magnétisme possédées par les points de l'aiguille peu éloignés des extrémités, doit toujours donner des résultats un peu plus faibles que les véritables, et l'erreur que l'on commet doit diminuer à mesure que le point que l'on considère est plus éloigné des extrémités.

D'autres aiguilles très-fines d'acier, aimantées à saturation par la méthode de la double touche, ayant offert des résultats semblables, soit par l'expérience, soit par le calcul, nous en concluons que la distribution du magnétisme dans les barreaux d'acier d'un diamètre quelconque est conforme à la règle donnée par M. Biot, et toutes les intensités pour chaque barreau peuvent être déduites au moyen de deux observations de l'équation

$$y = A\,\mu^x.$$

Dans les expériences précédentes, nous avons négligé l'action du magnétisme terrestre, parce qu'elle était presque insensible, vu le peu d'intensité du magnétisme de l'aiguille. En effet, quand l'aiguille horizontale est chassée par l'action de l'aiguille verticale, celle-ci tend à revenir dans le plan du méridien magnétique, non-seulement par la torsion du fil, mais encore par l'action du méridien magnétique. Or, si l'on cherche séparément la mesure de la force directrice, on voit qu'elle est tout à fait insensible dans nos expériences.

191. Cherchons enfin quelle est la position des pôles de l'aiguille capillaire, dans laquelle nous avons déterminé la distribution du magnétisme. Les pôles ne sont autre chose que les centres d'action magnétique. Ce centre d'action est analogue au centre de pesanteur dans les corps graves ; ainsi il sera placé, comme l'observe M. Biot, sur l'abscisse correspondante au centre de gravité de la courbe des intensités. Or, l'équation de la courbe est

$$y = \frac{B(1 + \mu^{2l})}{1 - \mu^{2l}}(\mu^x \mu^{2l-x});$$

et en désignant par x' l'abscisse de son centre de gravité, comptée de l'extrémité du fil, on aura

$$x' = \frac{-2\,l\mu^l - \dfrac{(1-\mu^{2l})}{l'\,\mu}}{(1-\mu^l)^2},$$

$l'\,\mu$ étant le logarithme hyperbolique de μ. Quand le fil est assez long pour que $\mu^l - \mu^{2l}$ puisse être regardé comme très-petit, l'expression de x' se réduit à

$$x' = -\frac{1}{l\,\mu};$$

mais comme $l'\,\mu = \log.\,\mu$, M $= 2{,}30258509$ et log.

$\mu = \log. 0,57 = -0,2441262$, on en déduira $x' = 1,7$. Or l'unité de mesure était 5 millimètres; il s'ensuit que dans une aiguille aimantée de 128 millimètres de longueur et de $\frac{1}{75}$ de millimètre de diamètre, les pôles sont situés à 8 milli. 5″ des extrémités, et n'en sont pas aussi près qu'on aurait pu le supposer.

§ III. *Distribution du magnétisme dans les barreaux d'acier non aimantés à saturation, et en ayant égard à l'action du magnétisme terrestre.*

192. Coulomb a traité la question de la distribution du magnétisme dans des fils d'acier, en admettant que ces fils étaient aimantés à saturation, que l'aimantation était régulière dans chaque moitié, et que la température était constante; mais il est important pour les recherches relatives au magnétisme terrestre de déterminer aussi cette distribution en tenant compte de l'action du magnétisme terrestre, quand les fils ne sont pas aimantés à saturation, que l'on renverse les pôles et que la température change dans toutes les parties du fil ou seulement dans quelques-unes. Ces diverses questions ont attiré l'attention de plusieurs physiciens, et entre autres de MM. Kupffer et Quetelet qui les ont traitées avec beaucoup de soin. Nous allons exposer leurs recherches, en commençant par celles de M. Kupffer.

Ce physicien (1) a employé, comme Coulomb, la méthode des oscillations pour déterminer la distribution du magnétisme libre dans les barreaux aimantés; seulement il a placé l'aiguille à une plus grande distance du barreau vertical qu'il ne l'avait fait, afin d'éviter les changements qui surviennent quelquefois dans le magnétisme de la petite aiguille.

Celle dont s'est servi M. Kupffer était plate, très-étroite; elle avait 12 millimètres de longueur et se trou-

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XXXVI, p. 50.

vait à une distance horizontale de 3 décimètres d'un barreau cylindrique, en acier fondu et non trempé, de 607 millim. de longueur et de 12,5 millim. d'épaisseur. Sous l'influence seule du magnétisme terrestre, l'aiguille exécutait 1,00 oscillations en 2′ 32″. L'unité des nombres de la quatrième colonne du tableau suivant est de 40 m.; les forces boréales sont indiquées par +, et les forces australes par —. En présence du barreau, soumis à l'action du magnétisme terrestre, il a obtenu les résultats suivants :

I. DISTANCE du point situé sur le prolongement de la petite aiguille au pôle boréal.	II. TEMPS que l'aiguille a employé à faire 100 oscillations.	III. LA FORCE correspondante à cette durée.	IV. DISTANCE du point du barreau situé sur le prolongement de l'aiguille, au point où l'attraction est nulle.
523,5	2′—30,4″	—0,0093	—6
483,5	2—30,4	0,0093	5
443,5	2—30,4	0,0093	4
403,5	2—30,8	0,0069	3
363,5	2—31,2	0,0046	2
323,5	2—31,6	0,0023	1
303,5	2—31,6	0,0023	½
283,5	2—32,0	0,0000	0
243,5	2—32,8	+0,0045	+1
203,5	2—32,8	0,0045	2
163,5	2—33,2	0,0068	3
123,5	2—33,6	0,0090	4
83,5	2—33,6	0,0090	5

Dans ce tableau, on voit que les expériences ont été faites de manière à pouvoir déterminer le point du barreau qui n'exerce aucune action sur l'aiguille; c'est le point d'indifférence, dont la position est dépendante de la distribution du magnétisme dans le barreau. En retournant le barreau, il perdit entièrement le magnétisme qu'il avait acquis dans sa première position par l'action de la terre; mais il ne reprit pas de suite l'état magnétique opposé, si ce n'est aux extrémités, où il se manifesta d'abord un degré de magnétisme très-faible.

193. Pour déterminer l'état du barreau quand il recevait un faible degré de magnétisme, il le fit glisser perpendiculairement sur le pôle boréal d'un aimant artificiel très-fort, et le soumit à l'expérience en plaçant le pôle boréal en haut.

DISTANCE du point situé sur le prolongement de la petite aiguille au pôle boréal.	TEMPS que l'aiguille a employé à faire 100 oscillations.	FORCE correspondante à cette durée.	DISTANCE du point du barreau situé sur le prolongement de l'aiguille, au point où l'attract. du barr. est nulle.
71,5	3′— 7″,2	+0,1475	+7
111,5	3 — 6,8	0,1463	6
151,5	3 — 3,6	0,1362	5
191,5	2 —58,1	0.1186	4
231,5	2′—52″,8	+0,0970	+3
271,5	2 —46,4	0,0717	2
311,5	2 —39,2	0,0383	7
351,5	2 —32,0	0,0000	0
391,5	2′—26″,0	—0,0363	—1
431,5	2 —20,4	0,0745	2
471,5	2 —16,4	0,1047	3
511,5	2 —12,8	0,1342	4
551,5	2 —10,8	0,1517	5
LE BARREAU AYANT ÉTÉ RETOURNÉ.			
546,5	2′— 9″,2	—0,1662	—5
506,5	2 —11,2	0,1481	4
466,5	2 —14,8	0,1175	3
426,5	2 —19,6	0.0803	2
386,5	2′—25″,2	—0,0415	—1
346,5	2 —32,0	0,0000	0
306,5	2 —38,8	+0,0363	+1
266,6	2 —46,4	0,0717	2
226,4	2′—54″0,	+0,1025	+3
186,5	3 — 1,2	0,1283	4
146,5	3 — 6,4	0,1450	5
106,5	3 —10,0	0,1558	6
66,5	3 —11,2	0,1593	7

Ces résultats nous montrent 1° que le pôle austral du barreau était plus fort que le pôle boréal, et que le point

d'indifférence était plus près du pôle le plus fort que de l'autre; 2° que lorsque le barreau a été retourné, les forces magnétiques dans les différents points ont été augmentées. Le point d'indifférence s'est alors approché du milieu. Ces changements ont exigé plusieurs heures pour s'effectuer entièrement. Toutes les expériences faites jusqu'ici prouvent qu'à mesure que les forces magnétiques du barreau augmentent, le point d'indifférence se rapproche lentement du milieu; il s'en éloigne au contraire quand elles diminuent.

194. Pour mieux montrer l'influence du magnétisme terrestre sur la distribution et l'intensité des forces magnétiques libres d'un barreau aimanté, M. Kupffer a rendu plus magnétique le barreau en le passant plusieurs fois perpendiculairement dans toute sa longueur sur le pôle boréal du même aimant artificiel, et le soumit ensuite à l'expérience. Il observa encore que le magnétisme du barreau est plus grand après le renversement qu'avant. Enfin on tire, des observations de M. Kupffer, qu'un barreau aimanté vertical a plus de force lorsque le pôle boréal dans notre hémisphère est tourné en bas que dans la position contraire; nous avons peine à nous expliquer ce résultat, et qu'un barreau aimanté suivant la méthode employée ci-dessus est toujours plus fort au pôle immédiatement produit par le pôle de l'aimant qu'à l'autre; dès lors le point d'indifférence doit être plus près du premier que de celui-ci. Le même barreau a été aimanté ensuite à saturation par la méthode de Coulomb : l'aiguille suspendue, qui avait perdu un peu de son magnétisme, mettait 2′ 33″, à exécuter 100 oscillations.

DISTANCE du point situé sur le prolongement de la petite aiguille au pôle boréal.	TEMPS que l'aiguille a employé à faire 100 oscillations.	FORCE correspondante à cette durée.	DISTANCE du point du barreau situé sur le prolongement de l'aiguille, au point où l'attraction est nulle, dirigé en haut.
LE POLE BORÉAL DIRIGÉ EN HAUT.			
300,0	2'—33"2,	0,0000	0
340,0	2 — 4,4	—0,2201	—1
380,0	1 —48,0	0,8313	—2
420,0	1'—37,6	—0,6239	—3
460,0	1 —31,6	0,7763	4
500,0	1 —27,2	0,3891	5
540,0	1'—25"2	—0,9515	—6
260,0	3 —43,2	+0,2253	+1
EN RETOURNANT L'AIGUILLE.			
220,0	15'—26",	+0,4144	+2
180,0	8 —44",8	0,6239	3
140,0	2'—48",4	+0,7787	+4
100,0	2 —27,2	0,88-6	5
60,0	2'—18",8	+0,9457	+6
LE POLE BORÉAL DU BARREAU TOURNÉ EN BAS.			
304,0	2 —33",2	0,0000	—0
344,0	1'— 4,4	—0,2201	—1
384,0	1 —48,0	—0,4313	—2
424,0	1 —37",2	—0,6324	—3
464,0	'—30,4	0,7975	—4
504,0	1 —26,8	0,9012	—5
544,0	1'—24",8	—0,9645	—6
264,0	3 —40,0	+0,2195	+1
EN RETOURNANT L'AIGUILLE.			
184,0	3'—44",0	+0,6254	+3
144,0	2 —47,2	0,7838	+4
104,0	2'—25",	+0,8978	+5
64,0	2 —17,2	0,9573	6

Ces résultats confirment les conséquences qui ont été déduites des premières observations. Nous devons prévenir que la durée de 100 oscillations ayant été un peu

moindre que $2' \, 33''_{,2}$, il peut y avoir une erreur de 1 à 2 millim. dans la position du point d'indifférence.

195. Il était important de vérifier si, dans un barreau horizontal, on trouvait la loi énoncée précédemment, savoir, qu'un barreau aimanté vertical a plus de force lorsque le pôle boréal est tourné en bas que dans la position contraire. A cet effet, il traça sur une feuille de papier plusieurs lignes parallèles, et les coupa par une ligne perpendiculaire qu'il dirigea dans le méridien magnétique. Une petite aiguille aimantée, librement suspendue à un fil simple de soie, fut placée à peu de distance, de manière que son point de suspension correspondît au point d'intersection d'une des parallèles et de la perpendiculaire. Pour trouver le point d'indifférence d'un barreau, il plaça celui-ci sur une des lignes parallèles, et le recula ou l'avança toujours dans la direction de ces lignes jusqu'à ce que l'aiguille ne fût plus déviée du méridien magnétique; l'intersection du barreau (ou de la ligne des pôles) avec la ligne perpendiculaire donnait le point d'indifférence. Il calcula ensuite la force de chaque pôle par la méthode des oscillations.

Le point d'indifférence ayant été déterminé, M. Kupffer le plaça sur la ligne de l'aiguille à une distance de 16 centimètres, tantôt du côté du pôle nord, tantôt du côté du pôle sud; puis il compta chaque fois la durée d'un certain nombre d'oscillations, et répéta les mêmes expériences en retournant le barreau. On prit un barreau cylindrique en acier fondu non trempé de 60 cent. de long, et 12,5 millimètres de côté, et une aiguille de 14 millim. qui employait $2' \, 38''_{,4}$ à exécuter 100 oscillations par l'influence seule de la terre.

Le barreau fut aimanté à saturation et placé sur la ligne de l'aiguille; le pôle boréal était tourné vers le nord, et le pôle austral vers le pôle boréal de l'aiguille; celle-ci fit 200 oscillations en $1' \, 45''_{,2}$, ce qui correspond à une force de 3,2157; en plaçant le pôle boréal du barreau vis-à-vis du pôle austral de l'aiguille, le même nombre d'oscillations fut exécuté en $1' \, 45''_{,6}$, ce qui donne une force

de 3,1885. En retournant le barreau, l'aiguille se retourna également et l'on trouva pour la valeur des forces 3,0339 et 3,1037. Ces résultats montrent donc, comme on devait s'y attendre, en raison de l'action du magnétisme terrestre, que le barreau exerce une force plus considérable lorsque son pôle boréal est tourné vers le nord que lorsqu'il se trouve dans une position opposée.

196. M. Kupffer a trouvé que la forme des extrémités d'un barreau exerce une influence sur sa force magnétique et la position du point d'indifférence, comme on va le voir.

Un barreau cylindrique en acier fondu et non trempé, de 43 centimètres de longueur et de 12 millim. $\frac{1}{2}$ de diamètre, fut arrondi à l'une de ses extrémités, aimanté à saturation, puis placé sur la direction de l'aiguille à 14 centimètres de distance. Lorsque le pôle nord du barreau était dirigé vers le sud, la force du pôle boréal et arrondi s'est trouvée égale à 2,0319, et celle du pôle austral à 2,1558; dans la position opposée du barreau, la force boréale du barreau était égale à 2,2198, et celle du pôle austral égale à 2,3006. Le point d'indifférence se trouva être au milieu. On recommença ces deux expériences en aiguisant de plus en plus en pointe l'extrémité qui avait été arrondie. La force du pôle pointu diminua à mesure que l'extrémité devint plus aiguë, et le point d'indifférence s'éloigna de cette même extrémité.

§ IV. *Des différents degrés de force magnétique que reçoit une aiguille d'acier par l'effet des frictions multiples qui servent à l'aimanter, et des changements qu'y apporte le renversement des pôles.*

197. M. Quetelet a traité, comme M. Kupffer, la question de la distribution du magnétisme libre dans les barreaux non aimantés à saturation; mais il s'est attaché particulièrement à reconnaître dans les aimantations partielles les effets du renversement des pôles. Il a employé à cet effet des barreaux parallélipipédiques de différentes

grandeurs, qui, en raison de leurs faces planes, lui permettaient d'exécuter les frictions avec plus de régularité, en suivant la méthode du contact séparé; les deux barreaux glissants étaient inclinés sous un angle de 10°. Il a mesuré la force de l'aiguille après chaque friction, en comptant la durée de cent oscillations. Pour ne pas avoir à faire des corrections relatives aux changements survenus en raison de la température, il a opéré dans une chambre où elle était toujours à peu près constante. Le nombre des frictions a été porté jusqu'à trente doubles.

L'aiguille cylindrique dont il a fait usage avait 646 millimètres de longueur, pesait 5445 milligr., et était terminée à ses deux extrémités en deux pointes coniques. Les deux barreaux destinés à l'aimantation avaient la même forme, d'une longueur de 150 millimètres; l'un d'eux pesait 86175 milligr., et l'autre 85300. Le premier exécutait 10 oscillations en 90 secondes, et le second le même nombre d'oscillations en 86 secondes 56 centièmes. Leur moment statique déterminé par la formule

$$m = \frac{x^2 P l^2}{3 g T^2}$$

a donné 2088 $\frac{2}{10}$ millig. pour le premier, et 2234 $\frac{2}{10}$ pour le second ; la force était la même que celle qu'auraient exercée les poids précédents suspendus à des bras de levier de 1 millimètre. Nous rapportons ici les résultats déduits de l'observation et d'une formule dont l'expression générale est $i = \text{I}(1 - \mu^{x^t})$; I étant l'intensité totale que peut prendre le barreau, et i la force reçue après un nombre x de doubles frictions, μ et a deux constantes dépendantes de la force de coercion de l'aiguille, de sa force, etc. Cette formule, dans le cas que nous considérons, est devenue

$$i = 10\left(1 - 0{,}7523^{x^{0,663743}}\right).$$

On a pris pour unité la force qu'aurait l'aiguille si elle employait 100 secondes de temps à faire 10 oscillations.

FRICTIONS.	INTENSITÉS		DURÉE DE 10 OSCILLAT.		DIFFÉRENCE.
	observées.	calculées.	obervée.	calculée.	
			"	"	"
1re ...	... 2,665 ..	... 2,477 ..	... 61,25 ..	... 63,54 ..	.. +2,29
2e	... 3,639 ..	... 3,630 ..	... 52,42 ..	... 52,49 ..	.. +0,07
3e	... 4,430 ..	... 4,457 ..	... 47,51 ..	... 47,37 ..	.. −0,14
4e	... 5,086 ..	... 5,105 ..	... 44,34 ..	... 44,26 ..	.. −0,08
5e	... 5,472 ..	... 5,632 ..	... 42,75 ..	... 42,14 ..	.. −0,61
6e	... 5,745 ..	... 6,074 ..	... 41,72 ..	... 40,58 ..	.. −1,14
8e	... 6,504 ..	... 6,775 ..	... 39,21 ..	... 38,42 ..	.. −0,79
10e	... 7,433 ..	.. 7,308 ..	... 36,68 ..	... 36,99 ..	.. +0,31
12e	... 7,720 ..	... 7,726 ..	... 36,00 ..	... 35,98 ..	.. −0,02
16e	... 8,656 ..	... 8,335 ..	... 34,00 ..	... 34,68 ..	.. +0,68
20e	... 8,895 ..	... 8,748 ..	... 33,53 ..	... 33,81 ..	.. +0,28
30e	... 9,675 ..	... 9,342 ..	... 32,15 ..	... 32,72 ..	.. +0,57

L'accord qui règne entre le calcul et l'observation prouve assez que les différences peuvent être attribuées à quelques circonstances légères dont on n'a pu tenir compte dans l'aimantation. Il a vérifié encore l'exactitude de sa formule en soumettant au calcul les différents résultats qu'il a obtenus avec d'autres aiguilles; l'accord a toujours été satisfaisant entre l'observation et le calcul.

198. Passons maintenant aux effets produits par le renversement des pôles d'une aiguille ou d'un barreau qu'on aimante. M. Quetelet ayant pris un barreau d'acier anglais de 15 centimètres de longueur sur 15 millimètres de largeur et environ 7 d'épaisseur, il commença par donner, dans la première série d'expériences, une friction sur chacune des deux grandes faces du barreau; après la 24e friction, le barreau fit 10 oscillations en 145",8. En continuant les frictions, il lui fut impossible de lui faire acquérir une plus grande force. Il chercha s'il n'était pas possible d'augmenter la force magnétique en faisant 24 nouvelles frictions sur les deux autres faces : il trouva effectivement que le barreau n'employait plus que 127",5 au lieu de 145",18 pour exécuter 10 oscillations. Il se détermina donc à faire dorénavant des frictions com-

plètes sur les six faces, afin d'avoir des résultats comparables. Les deux tableaux suivants renferment les observations faites en renversant successivement les pôles. Les séries paires comprennent celles qui sont relatives à la même position des pôles; il en est de même des séries impaires. Ainsi, dans la première série, la 3e, etc., le pôle boréal se trouve à la même extrémité de l'aiguille.

DURÉE DE 10 OSCILLATIONS.

SÉRIES IMPAIRES.

NOMBRE de frictions.	1re série.	3e série.	5e série.	7e série.	9e série.	11e série.	13e série.	15e série.	17e série.
1 ...	195″,00	235″,2	250″,0	257″,3	262″,0	245″,5	292″,0	246″,0	276″,0
2 ...	172,33	163,1	173,3	182,2	180,0	182,5	193,5	183,2	183,6
3	165,00	158,2	159 3	170,7	164,5	171,8	178,0	170,0	172,0
4 .. .	159,60	148,3	154,7	163,3	160,5	165,2	174.0	166,5	164,5
6	155,20	142,0	150,3	150,3	157,0	159,5	166,6	159,5	158,0
12	150,23	140,0	146,7	145,3	153,0	154,2	158,2	154,5	154,0
24	145,18	»	»	»	»	»	»	»	»
24	127,5	135,3	141,8	141,5	148,5	150,7	153,7	151,9	153,0

SÉRIES PAIRES.

	2e série.	4e série.	6e série.	8e série.	10e série.	12e série.	14e série.	16e série.
1	Infini..	.. » ..	261,0	407,0	255,0	353,0	305,0	314,0
2	201,00	.. » ..	181,3	194,5	210,5	188,2	201,0	195,0
3	172,33	.. » ..	167,3	178,3	»	»	»	»
4	165,80	.. » ..	159.8	176,0	182,2	168,5	175,0	171,5
6	155,58	.. » ..	157,0	168,2	»	»	»	»
12 .. .	150,00	.. » ..	151,3	157,7	164,0	160,5	163,0	161,0
24	145,50	.. » ..	148,3	153,5	156,0	156,0	157 5	155,3

On voit 1° que les nombres de la seconde série sont à peu près les mêmes que ceux de la première série;

2° que la première friction sur les six faces du barreau, pour changer les pôles, a détruit sensiblement toutes les traces de magnétisme; 3° que chaque friction sur les six faces a produit le même effet que les deux frictions faites sur les grandes faces dans la première série d'expériences; que les 24 frictions complètes de la seconde série n'ont pas pu rendre au barreau la force qu'il avait après les 24 frictions complètes de la première.

Dans le troisième essai, les pôles se sont trouvés renversés dès la première friction complète. La force acquise après 24 frictions était aussi plus forte qu'à la fin de la série précédente, mais sans être aussi grande qu'après la première série. Ces faits tendent donc à prouver que le fluide magnétique, quand il est décomposé, éprouve de la difficulté à reprendre un arrangement nouveau et qu'il revient avec plus de facilité à son premier état. De tous ces résultats, on tire les conséquences suivantes : 1° une seule friction a suffi pour produire chaque fois le renversement des pôles et mettre le barreau dans un état magnétique contraire; 2° les aimantations de rang impair, c'est-à-dire celles qui tendaient à mettre les pôles dans le sens de la première aimantation, étaient les plus efficaces; 3° plus le nombre des renversements de pôles augmentait, moins le barreau avait de force à la fin de chaque série d'expériences, du moins jusque vers la douzième; 4° les intensités correspondantes à un même nombre de frictions, qui étaient d'abord très-inégales pour les séries d'ordre pair et impair, ont approché vers une limite où les différences étaient bien moins grandes, et seraient probablement devenues nulles si le fluide s'était symétriquement distribué dans les deux moitiés du barreau; 5° le renversement des pôles, qui tendait à remettre le barreau dans son premier état, tout en continuant à s'effectuer avec plus de facilité que pour les séries d'ordre pair, éprouvaient néanmoins plus de difficultés après un certain nombre d'aimantations.

199. On calcule facilement avec les observations précédentes les intensités finales de l'aiguille aimantée après

chaque série de frictions. Nous donnons ici les nombres qui les représentent.

APRÈS.	INTENSITÉ finale de l'aiguille.	APRÈS.	INTENSITÉ finale de l'aiguille.
La 1re série	6,139	La 2e série	4,724
3e	5,463	4e	»
5e	4,973	6e	4,547
7e	4,995	8e	4,234
9e	4,535	10e	4,109
11e	4,403	12e	4,109
13e	4,233	14e	4,031
15e	4,334	16e	4,146
17e	4,272		

M. Quetelet a trouvé que les valeurs moyennes des dernières séries d'observations pouvaient être représentées par la formule

$$i = 4,38\left(1 - 0,36^{\sqrt{x - 0,82x}}\right),$$

pour les séries d'ordre impair, et par

$$i = 4,1\left(1 - 036^{\sqrt{x - 0,92x}}\right),$$

pour les séries d'ordre pair, i étant l'intensité cherchée et x le nombre de frictions.

On peut consulter son Mémoire (1), pour voir les diverses applications qu'il a faites de cette formule, relativement aux relations qui existent entre la force des barreaux qu'on aimante et celle des barreaux qui servent à l'aimantation.

Nous avons vu (182) que Coulomb a reconnu, par diverses expériences, que si l'on aimante à saturation deux aiguilles de même nature, dont les dimensions sont homologues, les moments des forces directrices sont entre eux comme les cubes des dimensions homologues.

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. LIII, p. 205.

M. Quetelet s'est occupé de nouveau de cette question. Il n'est pas d'abord arrivé au même résultat, puisqu'il a trouvé que les barreaux aimantés, qu'il a soumis à l'expérience, avaient reçu des forces dont les moments étaient comme les carrés de leurs dimensions homologues; mais il pense que cette discordance peut tenir à la différence de l'acier employé. Il suffit, ajoute-t-il, de supposer que les barreaux glissants communiquent aux barreaux frictionnés, de même dimension et de même nature des forces dont les moments sont égaux, pour accorder les résultats de Coulomb et les siens. Nous ne pouvons suivre ici cette discussion, nous renvoyons en conséquence au Mémoire de M. Quetelet (1).

§ V. *Des aiguilles aimantées, de leurs formes, de leurs dimensions et de leur trempe.*

200. La question relative à la meilleure forme à donner aux aiguilles aimantées et au degré de trempe nécessaire pour leur procurer le plus fort magnétisme possible, est de la plus haute importance pour les observations du magnetisme terrestre; aussi la traiterons-nous avec des développements suffisants.

L'expérience (2) a prouvé à Coulomb qu'à même longueur, même poids et même épaisseur, une lame taillée en flèche (fig. 91) avait un momentum magnétique plus grand qu'un parallélogramme rectangle; voici les expériences qu'il a faites à ce sujet :

Dans une lame d'acier, il coupa trois aiguilles de six pouces de longueur chacune; la première avait la forme d'un parallélogramme rectangle de 9 lignes $\frac{1}{2}$ de large et pesait 382 grains; la seconde, de même forme, avait 4 lignes $\frac{3}{4}$ de large et pesait 191 grains; la troisième, taillée en flèche, avait à son milieu 9 lignes $\frac{1}{2}$ de large et pesait comme la deuxième 191 grains.

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. LIII, p. 276.
(2) Mémoires de l'Acad. des sc., 1789, p. 493.

Ces trois aiguilles, ayant été trempées au rouge blanc, furent aimantées à saturation, puis suspendues dans la balance magnétique.

La première a été retenue à 30 degrés du méridien magnétique par une force de torsion

égale à..............	85 degrés.
La seconde exigeait une force égale à	49
La troisième....................	53

Les aiguilles recuites à consistance d'un ressort violet ont donné pour

La première....................	118 degrés.
La seconde.....................	65
La troisième....................	68

Les aiguilles recuites couleur d'eau :

La première....................	126 degrés.
La seconde....................	68
La troisième....................	3

Les aiguilles recuites à un degré de chaleur rouge obscur :

La première....................	134 degrés.
La seconde.....................	70
La troisième....................	79

Les aiguilles rougies à blanc et refroidies lentement ont donné à peu près le même résultat que lorsqu'elles étaient trempées rouge blanc.

Ces résultats montrent que dans les lames, l'état de trempe très-roide est celui qui leur donne le moins de magnétisme; que depuis l'état de la plus forte trempe, le magnétisme des lames va toujours en augmentant dans tous les degrés de recuit, jusqu'à ce que ce recuit soit d'un rouge très-sombre. Le magnétisme diminue ensuite à mesure que la lame est recuite à un plus grand degré de chaleur. Ces résultats montrent encore que dans les lames de même épaisseur et de même poids,

celles qui sont taillées en flèche ont un moment magnétique un peu plus grand que les aiguilles parallélogrammatiques.

Coulomb a fait plusieurs séries d'expériences sur la force magnétique des lames, eu égard à leur longueur.

Les lames qu'il a soumises à l'expérience étaient d'un acier très-pur, et avaient 3 lignes de large, sur une longueur depuis 16 pouces jusqu'à 4 pouces ; il a cherché le temps que chacune d'elles employait à faire 20 oscill.

Celle de 16 pouces mettait	231 secondes.
12............	180
10............	154
8............	126
6............	98
4............	80

Des lames de même longueur, mais de 8 lignes de large, ont donné, pour le temps de 20 oscillations :

Celle de 16 pouces	254″
12......	202
8......	154
4......	104

Une lame de 12 pouces de long et de 3 lignes de large ayant exécuté 20 oscillations en 180″, et une lame de 4 pouces 20 oscillations en 80″, la différence du temps pour 20 oscillations dans ces deux lames est de 100″. Des expériences faites avec d'autres lames, dont la largeur n'était pas la même, lui ont montré qu'une diminution égale dans les longueurs donne à peu près la même diminution dans le temps des oscillations; ainsi la largeur des lames n'influe que très-peu sur cette diminution; le temps des oscillations décroît, à peu de chose près, proportionnellement aux diminutions des lames, et le temps total des oscillations est plus grand, épaisseur et longueur égales, pour des lames larges que pour des lames étroites.

201. Pour savoir de quelle manière varie le temps des oscillations, en augmentant l'épaisseur des lames, pour la même longueur et la même largeur, il prit des lames de même nature que celles de l'expérience précédente, mais un peu plus que triples en épaisseur, et chercha également le temps qu'elles mettaient à faire 20 oscillations.

Pour une longueur de	12 pouces	229″
	10......	208
	8......	176
	6......	151
	4......	128

En retranchant du temps qu'une lame de 12 pouces met à faire 20 oscillations, le temps employé par une lame de 4 pouces pour exécuter le même nombre d'oscillations, on a 101, quantité presque égale à celle que nous avons trouvée précédemment. Il résulte de là que l'épaisseur ne change pas l'accroissement du temps des oscillations, qui est toujours proportionnel à l'accroissement des longueurs.

§ VI. *De la force magnétique des aiguilles réunies en faisceaux, ou détachées de ces mêmes faisceaux.*

202. Pour étudier la distribution du magnétisme dans l'intérieur des aimants, Coulomb prit 16 aiguilles parallélogrammatiques rectangles dans la même tôle d'acier, de 6 pouces de longueur, 9 lignes $\frac{1}{2}$ de large, et du poids de 382 grains chacune. Il les fit recuire à blanc sans les tremper, pour être sûr de les avoir toujours dans le même état ; il les aimanta à saturation, et forma des faisceaux avec un certain nombre de ces aiguilles, les pôles semblables du même côté, et les aiguilles liées ensemble avec un fil de soie assez fort pour les serrer les unes contre les autres.

Le faisceau fut placé dans la balance magnétique et

éloigné de 30 degrés du méridien magnétique, comme ci-dessus.

Une seule aiguille a exigé, pour rester à cette distance, une force de torsion mesurée par.... 82 degr.

2	aiguilles réunies.	125
4	aiguilles réunies.	150
6	aiguilles réunies.	172
8	aiguilles réunies..................	182
12	aiguilles réunies.	205
16	aiguilles réunies..................	229

Ces résultats prouvent que la force magnétique de chaque faisceau croît dans un rapport beaucoup moindre que le nombre des lames. Huit aiguilles différentes des précédentes, réunies, ont exécuté 20 oscillations en 242". Coulomb voulant pénétrer dans l'interieur des aimants, a déterminé l'état magnétique de chacune des aiguilles composant le faisceau de 16 aiguilles et celui de 8. Pour cela il les a séparées toutes, et les a placées successivement dans la balance magnétique, en les éloignant de 30 degrés du meridien magnétique; il a trouvé que les deux aiguilles extrêmes, c'est-à-dire celles qui formaient les deux surfaces du faisceau, avaient une plus grande force magnétique que les autres.

La première avait pour mesure........... 46
La seconde.......................... 48
Et la force moyenne de toutes les autres était égale à.................... 30

Une seule aiguille ayant donné pour le moment de sa force directrice 82 degrés, tandis que pour 16 feuilles réunies le moment magnétique moyen de chacune n'était que de 14,3 degrés, c'est-à-dire, à peu près la sixième partie de l'autre, il en résulte (1) que, dans les aiguilles de boussole, le moment du frottement des

(1) Neuvième vol. des Savants étrangers.

pivots augmentant dans un rapport plus grand que les pressions, et les moments magnétiques croissant dans un rapport beaucoup moins grand que les masses ou les pressions des pivots, les aiguilles peu épaisses et très-légères, à longueurs égales, doivent être préférées à toutes les autres, comme nous l'avons déja dit.

203. En défaisant la lame composée de huit aiguilles, il a trouvé que la

1re lame de la surface exécutait	20 oscill.	en....	91″
2e lame..................	20	en....	231
3e lame..................	20	en....	278
4e lame..................	20	en....	211
5e lame..................	20	en....	222
6e lame..................	20	en....	237
7e lame, les pôles renversés..	20	en....	237
8e lame de la surface.......	20	en....	90

Ces résultats nous conduisent aux mêmes conséquences que ci-dessus, et nous montrent en outre qu'il peut y avoir des aiguilles intermédiaires dont les pôles soient renversés.

Nous devons encore faire observer que Coulomb a reconnu qu'un faisceau de lames prend à peu près le même degré de magnétisme qu'une seule lame de la même figure et du même poids ; ce qui porte à faire croire que, dans les aimants d'une seule pièce, le magnétisme va en diminuant de la surface au centre, comme dans les aimants composés de plusieurs lames.

§ VII. *Des aiguilles de boussole.*

204. Les aiguilles de boussole sont des aiguilles aimantées, munies à leur centre d'une chape en agate, qui repose sur un pivot d'un métal non magnétique. On corrige l'effet de l'inclinaison magnétique en plaçant un petit contre-poids sur un des bras de l'aiguille, pour la rendre horizontale : ce contre-poids varie suivant les latitudes.

L'axe de l'aiguille, ou la ligne qui joint ses pôles, doit se placer dans le méridien magnétique, si aucun obstacle ne s'y oppose; mais le frottement du pivot contre le fond de la chape est un obstacle de ce genre que la force directrice doit vaincre préalablement. Les aiguilles de boussole les plus parfaites sont celles dans lesquelles le frottement est le plus faible et la force directrice la plus grande possible. Quand l'axe de figure ne coïncide pas avec l'axe magnétique, on corrige les erreurs qui en résultent dans une première observation par la méthode du retournement. Toutes choses égales d'ailleurs, le frottement croît avec le poids de l'aiguille; pour le mesurer, il faut présenter l'aiguille de loin à un aimant : celui-ci la détourne d'abord de son méridien magnétique; et l'on voit de quelle manière elle y revient quand elle est abandonnée à elle-même. Les amplitudes des arcs auxquels elle s'arrête sont proportionnelles à l'énergie du frottement.

Coulomb prit une aiguille de boussole percée à son centre de gravité d'un trou et colla, à 3 ou 4 lignes au-dessus de ce trou, une petite lame de verre très-polie : cette lame se trouvait séparée de l'aiguille par le moyen de deux petits poteaux de bois, collés à l'aiguille et à la lame. Le tout pesait 150 grains. La lame de verre et les petits morceaux de bois pesaient ensemble 9 grains; l'aiguille avait 10 pouces de longueur, et faisait 10 oscillations en 60″.

L'aiguille fut placée horizontalement sur la pointe d'un pivot d'acier très-dur. Après l'avoir enfermée dans une boîte, il chercha, en lui présentant de loin le pôle d'une autre aiguille, les limites de son champ d'indifférence, ou l'angle formé avec toutes les directions, qu'elle pouvait prendre, sans que sa force directrice la ramenât à son véritable méridien : cet angle A était évidemment proportionnel au frottement.

1er Essai. L'aiguille, suspendue librement sur son pivot, a donné l'angle A de 8 ou 10'.

2e Essai. La même aiguille, chargée de deux petites plaques de cuivre, pesant ensemble 300 grains, a donné l'angle A de 30'.

3e Essai. Idem, chargée de 600 grains, 60'.

4e Essai. Idem, chargée de 1200 grains, 3° 15'.

5e Essai. Idem, chargée de 1800 grains, 5°.

Si nous supposons que le moment du frottement soit comme une puissance n du poids, ou plutôt de la compression, nous trouverons, en négligeant le premier essai, dont il est difficile, à cause de la petitesse de l'angle A, d'avoir une mesure juste, et en comparant ensuite le deuxième essai avec tous les autres, qu'il résulte des deuxième et troisième essais

$(450)^n : (750)^n :: 30' : 60'$, d'où $n = 1{,}357$.
Les 2e et 4e essais donnent $n = 1{,}703$.
Les 2e et 5e essais donnent $n = 1{,}571$.

En prenant une valeur moyenne, l'on a $n = 1{,}544$; ce qui indique que le moment du frottement est à peu près proportionnel à $P^{\frac{3}{2}}$, P étant la pression exercée par le système. Il en a conclu que, lorsque la pointe d'un pivot est comprimée par un plan impénétrable, tous les points du cercle de contact éprouvent à peu près une pression égale.

205. Il a fait un très-grand nombre d'expériences en suspendant, comme dans les essais précédents, les aiguilles aimantées par le moyen de plaques de verre, d'agate, de cuivre jaune et de différentes compositions, et il a toujours trouvé des résultats analogues à ceux que nous venons d'exposer.

Lorsque les pivots servaient depuis long-temps, et que leur pointe était usée, Coulomb a trouvé que le moment des frottements était assez exactement proportionnel aux pressions.

Pour peu que l'aiguille ne conserve pas son horizon-

talité, et qu'il y ait de petites courbures dans le fond des chapes, on trouve dans les résultats des inégalités dont il est impossible de se rendre compte.

Les chapes doivent être bien centrées, tournées avec soin, et doivent former dans leurs concavités un cône plutôt obtus qu'aigu; souvent, quoiqu'elles paraissent assez bien centrées et exactement polies, elles ont dans leur concavité des inégalités, des petits enfoncements qui s'engrènent avec la pointe du pivot : d'où peut résulter un dérangement dans le centre de gravité de la chape, qui se trouve alors plus bas. La chape ne tourne plus horizontalement, ce qui est un inconvénient qu'il faut éviter.

Les pivots doivent être plus ou moins aigus suivant les charges qu'ils sont destinés à soutenir. Dans les boussoles pour le service des vaisseaux, les pivots fatiguant beaucoup, non seulement à cause du poids dont les aiguilles sont chargées, mais encore à cause du mouvement continuel où elles sont, on est dans l'usage, et avec raison, de les faire plus renfoncés et moins aigus que ceux qui doivent soutenir des aiguilles destinées à faire des opérations dans un lieu fixe. La dureté des chapes et des pivots est la condition la plus essentielle pour la perfection de ces instruments; jamais le pivot ne doit être assez aigu pour pénétrer dans le solide de la chape, ni pour pouvoir plier sous son poids; l'extrémité du pivot, ainsi que le fond de la chape, est une petite surface circulaire. Coulomb a déterminé par la théorie et l'expérience le diamètre de ce cercle.

206. Voyons la longueur la plus favorable à donner aux aiguilles de boussole. Nous avons vu que les aiguilles qui ne sont pas très-courtes ont des forces directrices, à diamètre égal, proportionnelles à leurs longueurs, pourvu que la section transversale soit partout la même; et comme le frottement suit la même loi, toutes les aiguilles, quelles que soient leurs longueurs, pourvu qu'elles ne soient pas trop courtes, peuvent être employées avec avantage. Cela suppose, bien entendu, que la distribution du magnétisme est la même de chaque côté de leur centre de suspension.

Relativement à l'épaisseur à donner aux aiguilles, l'expérience prouve que la force directrice croît dans un rapport moindre que les épaisseurs, et que le frottement suit la loi des pressions; il en résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, il faut donner très-peu d'épaisseur aux aiguilles, et seulement le degré nécessaire pour qu'elles ne fléchissent pas.

§ VIII. *Des actions exercées sur l'aiguille aimantée par des sphères de fer.*

207. M. Barlow (1) a été conduit à l'étude de ces actions en cherchant le moyen de garantir les aiguilles de boussole de l'action des masses de fer qui se trouvent à bord des vaisseaux. Le travail qu'il a fait à ce sujet est tellement étendu, que nous ne pouvons en donner qu'un précis, qui cependant sera assez complet pour qu'on y retrouve les principaux résultats qu'il a obtenus. Nos suppressions portent particulièrement sur les détails de calcul.

M. Barlow a commencé par décrire sur une plate-forme unie plusieurs circonférences de cercles concentriques, de 8 à 16 pouces de rayon, et a fait passer par le centre commun une ligne droite dans la direction du méridien magnétique; puis, après avoir marqué les points est et ouest, il a divisé le cercle en parties égales de dix degrés chacune.

Ayant ajusté une aiguille aimantée au centre du cercle, il a appliqué successivement à chaque point de la division et à différentes distances du centre, des boulets ou bombes de 5 pouces $\frac{1}{2}$, 8 pouces et 10 pouces, qui pesaient 14 livres, 48 livres et 96 livres, et a noté dans chaque cas la déviation produite. L'aiguille a marché du nord vers l'ouest quand le boulet passait du nord au sud par l'est; et l'effet était produit dans une direction opposée lorsque le boulet passait dans l'autre demi-cercle. La plus

(1) An Essay on magnetic attractions and on the laws of terrestrial and electro-magnetism, by Peter Barlow. Second edition, London 1823.

grande déviation avait lieu quand les boulets se trouvaient entre les points sud et est ou sud et ouest du cercle.

Une petite balle solide de deux pouces de diamètre a produit un effet contraire, c'est-à-dire que la déviation a été d'abord orientale : elle atteignait son maximum entre le nord et l'est; décroissait, devenait nulle entre l'est et le sud; après quoi elle devenait occidentale, atteignait son maximum, et s'évanouissait de nouveau lorsque la balle était tout-à-fait au sud.

La même chose avait lieu, mais en sens inverse, quand la balle passait du sud au nord par l'ouest. Cette anomalie apparente resta d'abord sans explication. M. Barlow répéta ses premières expériences sur les bombes, mais en élevant cette fois le centre de l'aiguille aimantée au niveau du plan de l'équateur de chacune d'elles; il trouva, par exemple, qu'une déviation orientale avait d'abord lieu, et disparaissait lorsque la balle passait de l'est au sud, et que le contraire se montrait quand elle passait du sud à l'ouest et de l'ouest au nord.

En élevant l'aiguille de dix pouces au-dessus de la plate-forte, la déviation, au lieu d'être d'abord occidentale, comme dans la première expérience, ou d'abord orientale, ensuite zéro et occidentale, comme dans la dernière, elle devenait tout-à-fait orientale dans le premier demi-cercle et occidentale dans le second. Les résultats, dans ce cas, étaient donc inverses de ceux qu'on avait obtenus dans le premier cas.

Ces faits prouvent que la déviation dépendait de la position du centre par rapport à l'aiguille. Effectivement, si à chaque point, excepté au nord et au sud, on transportait le boulet de haut en bas dans la même verticale, on obtenait d'abord une déviation orientale et ensuite occidentale, ou d'abord occidentale et ensuite orientale; par conséquent, dans chacune de ces verticales, il devait y avoir quelque point où la déviation fût nulle. M. Barlow chercha si tous ces points étaient placés dans un plan, et quelle était l'inclinaison de ce plan par rapport à l'horizon.

208. A cet effet, il se procura une table fortement fixée en terre, et au milieu de laquelle se trouvait une ouverture circulaire d'un peu plus de dix pouces de diamètre, au travers de laquelle on pouvait élever et abaisser à volonté une bombe de dix pouces de diamètre, au moyen d'une poulie. La surface supérieure de la table était disposée comme la plate-forme, c'est-à-dire qu'elle portait un cercle divisé. L'aiguille fut portée autour du boulet. En élevant celui-ci jusqu'à ce que son action fût insensible, et l'abaissant ensuite graduellement, on nota la déviation à différentes hauteurs; on s'assura, par ce moyen, que plusieurs points sans action étaient tous placés dans un seul plan, dont l'inclinaison était d'environ 20 degrés, c'est-à-dire *que ce plan était tout-à-fait ou presque perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison.*

La cause de l'anomalie apparente observée avec la petite balle solide est facile à expliquer, le centre étant placé un peu au-dessus du pivot de l'aiguille, le plan de non attraction passait dessus ou dessous ce point, selon la position de la balle; tandis que dans les bombes le centre passait au-dessus dans toutes leurs positions, excepté quand on élevait l'aiguille.

M. Barlow soumit à l'expérience des bombes de plus fortes dimensions, et obtint les mêmes résultats.

Il existe dans chaque boulet de fer deux plans où l'on peut placer l'aiguille sans que sa direction soit influencée; l'un, qui est celui de non attraction, et l'autre, qui est le plan vertical correspondant au méridien magnétique.

On voit donc 1° que chaque boulet de fer a un *équateur magnétique*, qui se trouve dans le plan de non attraction, et que ce boulet possède, comme la terre, deux pôles magnétiques, l'un dirigé vers le nord et l'autre vers le sud, les lignes qui unissent ces pôles étant parallèles à la direction de l'aiguille d'inclinaison.

2° Que l'effet produit sur l'aiguille par le fer dépend entièrement de la position du centre du boulet, par rapport au pivot de l'aiguille, si l'on admet qu'une sphère (fig. 92)

A A′ A″ entoure de toutes parts le boulet de fer O, et que l'on prenne le cercle de non attraction QQ comme un équateur, et les pôles de ce cercle comme des pôles de la sphère, et le cercle perpendiculaire SN comme le méridien magnétique, dont les pôles seront S et N. On peut supposer que l'on décrive dessus des cercles de latitude et de longitude, et que l'on promène l'aiguille autour du boulet, dans ces différents cercles, en ayant soin de la tenir à *la même distance* du centre, de manière à pouvoir séparer les effets dus à la position de ceux qui proviennent d'un changement dans la distance. Afin de séparer l'effet dû à la longitude de celui qui a rapport à la latitude, on fait passer l'aiguille d'abord sur les cercles de latitude seulement.

M. Barlow, en opérant ainsi, a trouvé, après quelques expériences, que les déviations étaient les plus grandes dans le cercle qui passait des pôles à travers les points est et ouest de l'équateur. Il considéra dès lors ce plan comme son principal méridien dont la longitude était nulle.

209. Après avoir obtenu par cette méthode de nombreux résultats, il compara entre elles les lignes trigonométriques des angles de déviation, et parvint à découvrir la loi suivante, savoir : que les tangentes des déviations sont proportionnelles au rectangle du sinus et du cosinus de la latitude, ou au sinus de la double latitude. Ses expériences sur la longitude lui ont montré que la déviation était proportionnelle au cosinus de longitude.

M. Barlow a répété toutes les expériences précédentes avec des appareils plus parfaits que ceux dont il avait fait usage avant, et pour la description desquels on peut consulter son ouvrage. La détermination précise de l'inclinaison du plan de non attraction l'a d'abord occupé.

Le centre de l'aiguille aimantée fut placé à cet effet successivement à chaque division de 5° d'une circonférence d'un rayon de 20 pouces. Le boulet fut élevé ou abaissé jusqu'à ce que l'aiguille eût atteint exactement sa position magnétique convenable. On mesura avec soin la

hauteur du centre du boulet au-dessus ou au-dessous du pivot de l'aiguille, et l'inclinaison du plan correspondant à chaque position de l'aiguille fut calculée au moyen de la formule

$$\tan. \mathrm{I} = \frac{h}{r \cos. a} = \frac{h}{r} \sec. a,$$

dans laquelle I est l'inclinaison, r le rayon du cercle qui, dans l'exemple actuel, est de 20 pouces, h la hauteur ou l'abaissement observé du centre du boulet, et a l'angle du point nord ou sud du cercle. Dans la table suivante, pour la facilité du calcul, on a pris la moyenne de quatre hauteurs ou abaissements dus à des positions correspondantes semblables des points est ou ouest.

EXPÉRIENCES.

POSITION de la boussole, ou valeur de a.	HAUTEURS ET ABAISSEMENTS OBSERVÉS				MOYENNE valeur de h.	INCLINAISON calculée par la formule $\tan. \mathrm{I} = \frac{h}{z} \sec. a.$
	du nord vers l'est. — Abaissem.	du nord vers l'ouest. — Abaissem.	du sud vers l'est. — Hauteur.	du sud vers l'ouest. — Hauteur.		
°						°
5..	.. 7.10 ..	.. 7,00 ..	.. 7,05 ..	... 7,05 ..	. 7,05 .	..... 19 20
10.	.. 7,05 ..	.. 7,00 ..	.. 6,95 ..	.. 7,00 ..	. 7,00 .	..... 19 34
15..	.. 6.80 .	.. 6,80 ..	.. 6,80 .	.. 6,80 ..	. 6,80 .	. .... 19 23
20 .	.. 6,65 ..	.. 6,70 ..	.. 6,55 ..	... 6.50 ..	. 6.60 .	.... 19 21
25..	.. 6,40 ..	.. 6,40 ..	...6.40 ..	.. 6,40 ..	. 6.40 .	..... 19 27
30.	.. 6,05 ..	.. 6.10 ..	.. 6.10 .	... 6,15 .	. 6,10 .	.... 19 24
35..	.. 5,80 ..	.. 5,80 ..	.. 5.80 ..	... 5,80 ..	. 5,80 .	..... 19 30
40..	.. 5,50 .	.. 5,40 ..	.. 5,40 ..	... 5,50 ..	. 5,45 .	..... 19 11
45..	.. 5,00 ..	.. 5,00 ..	.. 5.00 .	... 5,00 ..	. 5,00 .	..... 19 28
50 .	.. 4,55 ..	.. 4,50 ..	. 4,50 ..	... 4,45 ..	. 4,50 .	..... 19 18
55..	.. 4,07 ..	.. 4,05 ..	.. 4.06 ..	.. 4,06 ..	. 4.06 .	..... 19 27
60.	.. 3,57 ..	.. 3,52 ..	.. 3.52 ..	.. 3.55 ..	. 3,54 .	..... 19 26
65..	.. 3,00 ..	.. 3,00 ..	.. 3,00 ..	... 3,00 ..	. 3,00 .	..... 19 35
70..	.. 2,35 ..	.. 2,37 .	.. 2,37 .	... 2,35 ..	. 2,36 .	..... 19 01
75..	.. 1,85 ..	.. 1,80 ..	.. 1 85 ..	... 1,82 ..	. 1 83 .	..... 20 26
80..	. 1,25 ..	.. 1,25 ..	.. 1,22 ..	... 1,20 ..	. 1,23 .	..... 19 30
85..	....	....	....	....	....	
				Inclinaison moyenne...		.... 19°24′

On a donc 19° 24′ pour l'inclinaison du cercle de non attraction, valeur qui est sensiblement le complément de l'inclinaison magnétique qui a été trouvée, le 13 avril 1818, par les capitaines Kater et Sabine à Regent's park, égale à 70° 34′.

210. Ayant déterminé rigoureusement la position du plan de non attraction ou de l'équateur magnétique QQ (fig. 93), M. Barlow a cherché la loi d'attraction, par rapport à la latitude; d'abord dans le cercle S E N perpendiculaire à l'équateur QQ′, et qui passe par les points est et ouest du cercle horizontal H R. Des considérations de calcul, et le mode d'expérimentation dont il faisait usage, l'ont engagé à en agir ainsi.

Soient H Z R, une sphère concentrique avec une balle de fer C; N S, les pôles nord et sud par rapport à Q Q′ qui est l'équateur ou cercle de non attraction; Z le zénith de la sphère, H R un cercle parallèle à l'horizon, et S E un autre cercle qui passe par les points orientaux et occidentaux de l'horizon, où il rencontre aussi Q Q′; soit encore un quart de cercle Z L V qui aboutit à un point V de l'horizon, en coupant S E au point L; tirons une perpendiculaire L M qui rencontre le plan de H R dans la ligne qui joint V et le centre C.

L'arc E V étant donné, M. Barlow calcule le point L à l'endroit où l'arc S E est coupé par le quart de cercle Z V; l'arc L E sera la latitude de ce point par rapport à l'équateur QQ′; et les lignes L M et C M (le sinus et le cosinus de l'arc V L) indiqueront combien la boussole doit être élevée au-dessus du centre du boulet, et à quelle distance elle doit être placée du centre de la table pour correspondre au point L.

Maintenant, dans le triangle sphérique à angle droit V E L, l'angle droit était en V, on a l'angle L E V et l'arc E V. Pour trouver l'hypoténuse L E ou la latitude, et le côté, ou la perpendiculaire L V, on a

Pour la première :

$$\text{tang. } LE = \text{tang. } VE. \text{ sec. } VES,$$

Et dour la dernière

$$\text{tang. VL} = \text{sin. VE. tang. VES.}$$

Par le sinus et le cosinus de ce dernier arc, on détermine de suite les valeurs de LM et de CM pour un rayon donné.

Nous n'avons qu'à prendre pour VE les différents arcs ou divisions de table, c'est-à-dire $2\frac{1}{2}°$, $5°$, $7\frac{1}{2}°$, $10°$, etc., et pour l'angle VES l'inclinaison de l'aiguille (qui est égale à $70° 30'$), et l'on retrouve les différentes particularités dont il a été question précédemment, comme on peut le voir dans la table qui suit, à l'exception cependant des nombres de la dernière colonne, qui ont été obtenus au moyen d'une loi empirique dérivée de la première série d'expériences ; savoir, que la tangente de la déviation de l'aiguille est proportionnelle au sinus de la double latitude ; ou, ce qui est la même chose, le sinus de la double latitude, divisé par la tangente de déviation, est une quantité constante, la longitude étant zéro.

Résultats des expériences faites sur le cercle SE, dont la longitude est 0° ; boulet de 288 livres ; rayon de cercle de 12 pouces.

POSITION de la boussole.	Latitude.	Longitude.	HAUTEUR du centre.	DISTANCE du centre de la table.	DÉVIATION est de la boussole.	DÉVIATION ouest de la boussole.	DÉVIATION moyenne.	RAPPORT du sinus $\frac{2\lambda^*}{\tan. \Delta}$
			Pouces.	Pouces.				
2° 30′ E. ou W.	7° 27′	0° 0′	1,465.	11,91	10° 0′.	10° 15′.	10° 7 1/2′.	1,439
5 0	14 41	....	2, 87.	1,65	19 30.	19 45.	19 37 1/2	1,375
7 30	21 31	....	4, 15.	1,26	26 30.	26 30.	26 30	1,369
10 0	27 51	....	5, 28.	10,77	32 0.	31 30	31 45	1,335
12 30	33 35	....	6, 26.	10,28	34 15.	34 0.	34 7 1/2	1,365
15 0	38 45	....	7, 08.	9,68	35 45.	35 30.	35 37 1/2	1,363
17 30	43 22	....	7, 73.	9,15	36 15.	36 15.	36 15	1,362
20 0	47 28	....	8, 33.	8,63	35 30	36 0.	36 15	1,328
25 0	54 24	....	9, 20.	7,76	34 0	35 0	34 34	1,378
30 0	59 58	....	9, 79.	6,93	32 15	32 30	32 22 1/2	1,367
35 0	64 30	....	10, 21	6,30	30 0	29 45.	29 52 1/2	1,353*
40 0	68 18	....	10, 51.	5,79	26 45.	24 45.	26 45	1,363
50 0	74 21	....	10, 88.	5,03	21 0.	21 0.	21 0	1,354
60 0	79 6	....	11, 10.	4,54	15 15.	15 15.	15 15	1,362
70 0	83 4	....	11, 22	4,2[illegible]	10 0.	10 0.	10 0	1,359
80 0	86 38	....	11, 30.	4,05	5 0.	4 45	4 52 1/2	1,375
							Moyenne...	1,385

* λ indique la latitude et Δ l'angle de déviation du nord magnétique.

M. Barlow a opéré aussi sur un cercle SE avec des bombes pesant 288 livres, et ayant des rayons égaux à 15, 18 et 20 pouces.

Nous passons sous silence les résultats qu'il a obtenus dans ce cas.

Le peu de différence qui existe entre les nombres de la dernière colonne de la table précédente et de celle que nous ne rapportons pas ici, montre bien clairement, comme il a été dit précédemment, que la tangente de l'angle de déviation est proportionnelle au rectangle du sinus et du cosinus de la latitude, ou au sinus de la double latitude, la longitude étant zéro; ce qui revient à dire que pendant que l'on porte la boussole autour du globe dans un grand cercle passant par les points est et ouest de l'horizon, il est perpendiculaire au cercle de non attraction, ou équateur QQ′.

211. Occupons-nous maintenant de la loi d'attraction relative à la longitude.

Rappelons-nous que M. Barlow a conclu de quelques résultats de l'expérience et de déductions théoriques relatives à la détermination des forces, que là où la latitude est la même, la tangente de déviation est proportionnelle au cosinus de la longitude.

Trois méthodes pouvaient être employées pour soumettre les lois précédentes à l'expérience : ces méthodes consistaient à faire mouvoir la boussole sur un grand cercle, dont la longitude serait constante, ou sur un petit cercle dont la latitude était constante, ou sur un cercle dont la latitude et la longitude fussent toutes deux variables. M. Barlow a donné la préférence à la première et à la seconde, pour plus de facilité dans les calculs; néanmoins leur étendue est telle, que nous ne pouvons les rapporter ici; nous nous bornerons seulement à donner les résultats numériques.

Les nombres de la dernière colonne sont déduits de la loi dont il a été déja question, savoir, que les tangentes des angles de déviation sont proportionnelles au rectangle du sinus de double latitude et au cosinus de longitude; ce qui exige que le quotient $\frac{\text{sin. } 2\lambda \cos. l}{\text{tang. } \Delta}$ soit une quantité constante; λ est la latitude, l la longitude, et Δ l'angle de déviation observé. Expérimentons.

Dans un cercle, dont la longitude était de 58° 31', une bombe, ayant un rayon de 8 pouces et pesant 288 livres, a donné

POSITION de la boussole par rapport à B.	Latitude.	Longitude.	HAUTEUR du centre.	DISTANCE du centre de la table.	DÉVIATION est de la boussole.	DÉVIATION ouest de la boussole.	DÉVIATION moyenne.	RAPPORT de $\frac{\text{si. } \lambda \cos. l}{\text{tang. } \Delta}$
			pouces.	pouces.				
2° 30′ E. ou W.	2° 45′ S.	58° 31′	4,30.	17,48.	0° 30′..	0° 30′..	0° 30′..	....
5 0 .	9 50 ..	......	7,94.	16,16.	2 20 .	2 20..	2 20..	... 4,314
7 30 ..	20 14 ..	......	10,68.	14,49.	4 15..	4 25..	4 20..	... 4,473
10 0 ..	28 30 ..	......	12,60.	12,86.	5 20..	5 30..	5 25..	... 4,615
12 30 ..	34 19 ..	......	13,93.	11,41.	6 0..	6 0..	6 0..	... 4,628
15 0 ..	40 8 ..	......	14,85.	10,71.	6 0..	6 0..	6 0..	... 4,786
17 30 ..	44 16 ..	......	15,51.	2,14	6 30..	6 30..	6 30..	... 4,582
20 0 ..	47 35 ..	......	15.99.	8,28.	6 30..	6 30..	6 30..	... 4,665
25 0 ..	52 41 ..	......	16,60.	6,96.	6 30..	6 0.	6 15..	... 4,508
30 0 ..	56 23 ..	......	16,97.	6,02.	6 0..	6 0..	6 0..	... 4,582
35 0 ..	59 12 ..	......	17.20.	5,31.	6 0..	6 0..	6 0..	... 4,271
40 0 ..	61 27 ..	......	17,36.	4,78.	5 30..	5 30..	5 30..	... 4,554
50 0 ..	64 52 ..	......	17,54.	4,06.	5 0..	5 0..	5 0..	... 4,590
60 0 ..	67 27 ..	......	17,64.	3,60.	4 30..	4 30..	4 30..	... 4,699

Les nombres de la dernière colonne de cette table et de deux autres que je ne rapporte pas ici présentent plus de différence que ceux qui ont servi à établir la loi sur la latitude. M. Barlow fait observer à ce sujet que les déviations étant beaucoup plus petites que dans le premier cas, une très-légère erreur d'observation produit un effet plus sensible; car, lorsque l'on approche l'aiguille plus près du centre de la table, on peut commettre facilement une petite erreur en l'ajustant, ce qui donne naissance à un plus grand désaccord. Néanmoins, M. Barlow pense qu'il a déterminé la loi sur la longitude, au moins par approximation suivant cette loi : tant que la latitude est constante, la tangente de déviation est proportionnelle au cosinus de longitude, comme nous l'avons établi déja.

212. Dans les expériences précédentes, la latitude variait, tandis que la longitude restait constante. M. Barlow a voulu aussi expérimenter, en faisant passer l'aiguille autour du boulet dans un cercle où ces deux quantités changeraient; mais il nous est impossible de donner les développements relatifs aux recherches auxquelles

il s'est livré pour déterminer la loi de l'attraction par rapport à la distance, en raison de leur étendue.

De la coïncidence remarquable qui existe entre les résultats observés et les résultats calculés, il résulte clairement que la loi de l'attraction, par rapport aux distances, peut s'établir ainsi : que les tangentes des angles de déviation sont réciproquement proportionnelles aux cubes des distances.

Comme les forces magnétiques varient en raison inverse du carré de la distance, et la tangente de déviation en raison inverse du cube de cette même distance, il s'ensuit que le carré de la tangente de déviation est directement comme le cube de la force, ou que la tangente de déviation varie directement comme la puissance $\frac{3}{2}$ du pouvoir de la force.

213. On devait supposer, suivant toutes les probabilités, que le pouvoir de l'attraction devait suivre la loi directe des masses. Pour vérifier par l'expérience cette loi, M. Barlow s'est procuré un boulet massif de 10 pouces, semblable à celui dont il s'était servi dans l'expérience de la bombe de 10 pouces, et dont le poids était de 128 livres, c'est-à-dire, juste les $\frac{4}{9}$ du poids d'un boulet de 15 pouces; en les soumettant l'un et l'autre à l'expérience, il a obtenu

POSITION de la boussole.	DISTANCE DE 12 POUCES.		RAPPORT des tangentes.	DISTANCE DE 15 POUCES.		RAPPORT des tangentes.
	Déviation du boulet de 288 liv.	Déviation du boulet de 128 liv.		Déviation du boulet de 288 liv.	Déviation du boulet de 128 liv.	
2° 30′	10° 7 1/2	4° 0′	2.552	5° 7′ 1/2	2° 15′	2,279
5 0	19 37 1/2	8 30	2,385	10 7 1/2	4 30	2,267
7 30	26 30	11 45	2,397	14 7 1/2	6 30	2,207
10 0	31 45	16 15	2,269	16 52 1/2	7 45	2,227
12 30	34 7 1/2	17 0	2,216	18 37 1/2	8 30	2 254
15 0	35 37 1/2	17 30	2,272	19 45	9 0	2.267
17 30	36 15	18 15	2,352	20 15	9 15	2,265
20 0	36 15	18 15	2,353	20 7 1/2	9 15	2 250
25 0	34 30	17 0	2.248	19 15	8 45	2,269
30 0	32 22 1/2	15 45	3,246	17 37 1/2	8 0	2,259
35 0	29 52 1/2	14 15	2,261	16 0	7 15	2,254
40 0	26 45	12 0	2,386	14 5	6 15	2,319
50 0	21 0	9 45	2,238	10 45	4 45	2.285
60 0	15 15	7 0	2.222	7 30	3 20	2,261
70 0	10 0	4 0	2.521	5 0	2 15	2,227
80 0	4 52 1/2	2 15	2, 172	2 30	....	....

La moyenne des premiers rapports est 2.318 et celle des seconds 2.259; et la moyenne des deux est 2.288; mais le rapport des masses ou des cubes du diamètre est 2.25, d'où l'on voit que les tangentes des déviations sont proportionnelles aux cubes des diamètres, toutes choses égales d'ailleurs. Le cube des diamètres étant proportionnel aux masses, on devait en conclure que les tangentes de déviation étaient aussi proportionnelles aux masses; et telle est, en effet, la conclusion qu'il en tira, lorsqu'il fit l'expérience avec un obus de 10 pouces, dont le poids était de 96 livres, les $\frac{3}{4}$ de celui du dernier boulet de la même dimension; mais M. Barlow fut très-surpris de ne trouver aucune différence entre ces résultats et les premiers. En faisant une série d'expériences du même genre avec des obus et des boulets, il a trouvé, en comparant les résultats, qu'ils s'accordaient en tous points; dès lors il lui parut évident que le pouvoir d'attraction résidait tout entier à la surface et était indépendant de la masse. M. Barlow a fait encore des expériences multipliées avec des obus de différents dia-

mètres et de différentes épaisseurs, et toutes lui ont donné la même loi, savoir : que les tangentes de déviation sont proportionnelles aux cubes des diamètres, ou comme la puissance $\frac{3}{2}$ des surfaces, quels que soient le poids et l'épaisseur. Mais la force magnétique étant comme la surface, et la tangente de déviation comme la puissance $\frac{3}{2}$ des surfaces, il s'ensuit que le carré de la tangente de déviation varie directement comme le cube de la force, ou que la tangente de déviation varie directement comme la puissance $\frac{3}{2}$ de la force.

Bien que le pouvoir d'attraction réside à la surface et soit indépendant de la masse, cette loi a néanmoins des limites, puisque M. Barlow a reconnu que le fluide magnétique exige que le métal ait une certaine épaisseur excédant $\frac{1}{30}$, pour qu'il se développe et agisse avec un pouvoir complet. C'est un exemple remarquable de l'analogie qui existe entre les fluides électrique et magnétique.

§ IX. *Recherches de M. Haldat sur la force coercitive des aimants.*

214. Bien que les recherches de M. Haldat sur la force coercitive des aimants n'aient conduit à aucun principe nouveau, néanmoins nous croyons devoir en faire mention ici, pour montrer quelques applications des principes connus.

On prend une lame de tôle d'acier, destinée à la fabrication des cuirasses, de 2 à 3 décimètres carrés de surface et de 1 à 3 millimètres d'épaisseur. Après avoir décapé et adouci la surface avec une lime ou du grès fin, l'on trace dessus, avec l'extrémité d'un barreau aimanté, des figures quelconques; si l'on répand sur la surface une couche mince de limaille de fer et que l'on frappe doucement, celle-ci s'arrange sur les figures de manière à les rendre visibles. Cet arrangement a lieu d'une manière particulière : les parcelles de fer qui se trouvent d'abord répandues uniformément sur la sur-

face s'accumulent vers les limites du trait, en laissant à nu l'intervalle qui en marque l'épaisseur, de sorte qu'elles se trouvent rassemblées sur les lignes qui séparent les parties aimantées de celles qui sont neutres. Ces figures ont donc de la ressemblance avec celles que l'on forme à la surface de lames de bois, de verre, etc., au-dessous desquelles on place un aimant. M. Haldat a observé que cette ressemblance se montre jusque dans les plus petits détails. Ainsi, sur les lames de bois, de verre et autres, les parcelles de limaille se réunissent vers les parties où le magnétisme est le plus intense et s'y arrangent en pinceaux et en rayons : ces effets se montrent également sur les plaques de tôle.

Le magnétisme qui est ainsi développé dans ces plaques, par une simple friction ou même par l'approche d'un barreau, persévère pendant plusieurs mois ; mais il disparaît aussitôt qu'on élève leur température jusqu'au jaune paille.

M. Haldat n'a pu détruire les figures magnétiques par l'action du pôle opposé à celui dont il s'était servi pour les tracer, mais il a employé avec succès un autre procédé, qui mérite d'être signalé, lequel consiste à exciter dans les lames des vibrations réitérées et violentes : à cet effet il place la lame aimantée sur un madrier, et la frappe à coups précipités avec un petit maillet de bois ; deux minutes suffisent pour opérer la désaimantation. De faibles vibrations, telles que celles qui servent à produire les figures acoustiques découvertes par Chladni et Savart, sont inefficaces.

215. M. Haldat a remarqué que tous les corps durs peuvent, au moyen du frottement, aider à la décomposition du fluide magnétique dans le fer doux, si l'on favorise leur action par l'influence combinée d'aimants qui, seuls, seraient incapables de la produire. On prend des fils de fer non recuits, d'un décimètre de long et d'un millimètre de diamètre, que l'on place horizontalement entre deux barreaux opposés par leurs pôles contraires, et à une distance telle qu'ils ne puissent être aimantés ;

ces fils acquièrent la polarité dès qu'on les frotte avec des corps durs dans la direction des barreaux. Si l'on retourne ces mêmes fils et qu'on exerce de nouveau le frottement, on détruit la polarité pour leur en donner une autre en sens inverse.

Nous savons que M. Gay-Lussac a fait voir que l'on peut rendre magnétique le fer doux au moyen de la torsion. Cette action mécanique produit le même effet dans le fer qui est sous l'influence du magnétisme terrestre, que le frottement sur les fils de fer qui sont aimantés par influence. M. Haldat a fait voir, comme on devait s'y attendre, qu'en détordant un fil de fer doux qui a été aimanté par la torsion, on lui enlève sa polarité.

Tous ces faits s'expliquent parfaitement par les principes connus, et nous ne nous y arrêterons pas davantage.

§ X. *Observations sur la distribution du magnétisme dans les aimants, et sur la force coercitive.*

216. M. Nobili a fait dernièrement quelques expériences pour tâcher de découvrir de quelle manière la distribution du magnétisme s'opère dans l'intérieur des aimants; il a voulu voir, entre autres, jusqu'à quel point on pouvait considérer un cylindre aimanté comme formant un faisceau d'aiguilles très-fines de même longueur, toutes aimantées par le même côté; il a pensé qu'un semblable faisceau d'aiguilles devait se désaimanter presque entièrement. Pour s'assurer de ce fait, il a suivi la même marche que Coulomb. Il prit une cinquantaine d'aiguilles, dont il fit un petit paquet, qu'il aimanta ensuite avec le pôle d'un gros aimant; il défit ensuite le paquet pour déterminer la force magnétique de chaque aiguille; il les trouva toutes fortement aimantées dans le même sens; puis il reforma le faisceau en maintenant le contact des aiguilles aussi parfait que

possible avec un fil enroulé autour. Deux heures après, ayant délié le paquet, il observa de nouveau le magnétisme de chacune des aiguilles; il en trouva un bon nombre qui avaient acquis le magnétisme contraire. Ayant répété l'expérience sur un autre paquet d'aiguilles, mais au lieu d'attendre deux heures pour l'ouvrir, il le défit une demi-heure après, un certain nombre d'aiguilles avaient déja perdu tout le magnétisme qu'on leur avait communiqué. Toutes ces observations avaient été faites par Coulomb avant M. Nobili (203).

Ces faits prouvent que les aiguilles ne restent pas toutes aimantées au même degré; que les plus fortes désaimantent d'abord les plus faibles, qui prennent ensuite le magnétisme contraire, et que si elles avaient reçu toutes, dès le principe, le même degré d'aimantation, la vertu magnétique se serait bien vite éteinte dans tout le système. M. Nobili pense, d'après cela, que l'on ne doit pas considérer un barreau aimanté comme formant un faisceau d'aiguilles très-fines de même longeur, aimantées toutes du même côté.

Il est parti de la disposition en échelons des barreaux dans les faisceaux artificiels, pour indiquer comment il conçoit la distribution du magnétisme. Suivant cet arrangement, la barre centrale dépasse les barres latérales qui sont placées ensuite en échelons. Le barreau du centre, non seulement conserve son magnétisme, mais acquiert encore un plus grand degré de force que par tout autre arrangement. M. Nobili suppose que l'intérieur du barreau est divisé en autant de couches concentriques, et que le magnétisme sur ces couches diminue rapidement du dehors au dedans. Il cite, à l'appui de sa manière de voir, le fait suivant : si l'on veut concentrer dans les aimants artificiels, formés de barreaux en échelons, la plus grande force magnétique sur les bases latérales, il faut intervertir l'ordre des échelons, retirer en arrière la base centrale, et pousser en avant celles qui sont latérales. Pour indiquer comment il peut se faire que cette division en couches

concentriques s'opère, il explique ce qu'il entend par force coercitive.

On considère comme telle, la résistance qu'opposent les métaux magnétiques à leur aimantation et à leur désaimantation. L'acier non trempé se comporte comme le fer doux; mais il n'en est pas de même quand il est trempé. M. Nobili prétend que la trempe n'est pas la cause immédiate de la conservation de la vertu magnétique, et que les expériences précédentes montrent que la condition conservatrice dépend du mode même de la distribution du magnétisme dans les aimants. On ne peut admettre, dit-il, que l'aimant soit composé d'un nombre infini de fils élémentaires, tous aimantés au même degré, quelle que soit leur trempe, puisque tout le système se désaimanterait bien vite; mais, si l'on suppose que les éléments extérieurs soient plus aimantés que ceux de l'intérieur, on a alors un système capable de conserver une dose de magnétisme plus ou moins forte. Ce dernier fait a été établi dans les faisceaux composés par Coulomb et rentre dans les expériences de M. Barlow.

D'après cela, suivant cet habile physicien, la trempe fait acquérir à la masse un état tel, que les molécules extérieures, refroidies plus rapidement que celles de l'intérieur, se rapprochent plus que ne peuvent le faire celles-ci. L'acier trempé possède donc une croûte dont la densité et d'autres propriétés propres à la constitution sont d'autant plus différentes des couches internes que le refroidissement a été plus rapide. Le magnétisme se conserverait donc dans l'acier trempé, non parce qu'il existe une force coercitive telle que les physiciens l'ont admise jusqu'ici, mais bien parce que le magnétisme s'y distribue inégalement, en plus grande quantité à l'extérieur qu'à l'intérieur. Il part de ce principe pour expliquer comment il se fait que le fer doux, quand il a été battu sous le marteau ou passé à la filière, acquiert la propriété de conserver une petite quantité de magnétisme. Les coups de marteau et la filière rendent les parties extérieures plus compactes que celles de l'intérieur.

Par le même motif, pour la même trempe et la même quantité d'acier, les petites barres prendront, à proportion, plus de magnétisme que les grosses barres. L'expérience suivante tend effectivement à prouver que le magnétisme augmente davantage en proportion du degré de la trempe que de la masse du corps magnétique. M. Nobili a fait construire avec le même acier deux cylindres de même longueur et de même diamètre, l'un massif, et l'autre percé au milieu de part en part suivant son axe; le poids du premier était de 28 grammes et demi, celui du second de 16. Ces deux cylindres furent trempés de la même manière, et aimantés à saturation; l'un et l'autre, placés à la même distance d'une aiguille de boussole, donnèrent les déviations suivantes :

Pour le cylindre massif, 9 degrés et demi.
Pour le cylindre foré, 19.

La différence est, comme on voit, très-grande, et cependant le cylindre massif est d'une masse presque double de l'autre.

Suivant la manière de voir de M. Nobili, le cylindre foré étant trempé en même temps en dehors et en dedans, s'est recouvert des deux côtés de cette croûte, qui devient la puissance conservatrice du magnétisme, dès l'instant qu'il peut en recevoir une plus grande dose qui ne touche pas aux parties internes. M. Nobili avoue néanmoins qu'il règne encore une si grande obscurité sur ce qui se passe dans l'intérieur des aimants, qu'il n'a publié son opinion qu'avec une certaine réserve. Quoi qu'il en soit, les faits sur lesquels il l'appuie sont assez importants pour que nous ayons cru devoir les mentionner ici.

CHAPITRE VI.

DE L'INFLUENCE DE LA CHALEUR SUR LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU FER, DE L'ACIER ET DES AIMANTS.

§ 1er. *Des propriétés magnétiques du fer et de l'acier incandescents.*

217. Newton, dans son optique, a avancé que le fer rouge ne jouit pas de la propriété magnétique. Le P. Kircher (1), au contraire, assure que l'aimant attire le fer rouge aussi bien que le fer froid. Des résultats aussi contradictoires ont dû attirer l'attention des physiciens. Déja Cavallo (2) avait remarqué qu'ils provenaient d'observations faites à différents degrés de température. Il annonça seulement que le fer, à la température rouge, avait un pouvoir plus grand sur l'aimant que lorsqu'il était froid, et moindre au rouge blanc.

M. Scoresby avait fait la même observation. M. Barlow a repris ses expériences, et a trouvé la véritable cause des résultats contradictoires obtenus par Newton et le P. Kircher.

Les barreaux de fer qu'il a soumis à l'expérience sont des parallélipipèdes de 24 pouces de long et de 1 pouce $\frac{1}{4}$ de côté; placés dans le méridien magnétique sous l'angle de l'inclinaison magnétique et à une certaine

(1) De Magneti, lib. 1. Philosop. transac., v. 18, n° 214.
(2) On Magnetism, p. 312.

distance d'une boussole, ils ont donné les résultats suivants à la température ordinaire.

	Pouvoir magnétique.		Pouvoir magnétique.
Fer malléable..........	100	Acier (shear) trempé....	53
Acier fondu non trempé..	74	Acier (blistered) trempé..	53
Acier (blistered) non trempé	67	Acier fondu trempé......	49
Acier (shear) non trempé.	66	Fer fondu.............	48

Nous voyons que plus l'acier est doux, plus son pouvoir magnétique est grand. M. Barlow voulut déterminer à quel degré de chaleur l'action magnétique de ces différents métaux se rapproche l'une de l'autre : il a fait chauffer au rouge blanc des barres de fer, d'acier, etc., d'égales dimensions, et les a placées comme dans l'expérience ci-dessus. La fonte de fer, qui avait le pouvoir le plus faible à la température ordinaire, excéda le pouvoir des autres au rouge blanc. Le fer malléable, qui avait le pouvoir le plus fort, devint le plus faible quand il fut chaud, et il finit par n'exercer aucune action sur l'aiguille, quand on l'eut chauffé au blanc.

Cette action, au contraire, est très-intense à la chaleur rouge de sang. Il existe, en outre, une température intermédiaire où elle s'exerce en sens contraire ; c'est-à-dire que si l'on place l'aiguille et le barreau de manière que l'extrémité nord de l'aiguille soit attirée par le fer à froid, ce sera l'extrémité sud que le fer attirera lorsqu'on aura élevé sa température. On observe cet effet quand le fer passe par les nuances de rouge brillant et de chaleur rouge.

218. Pour connaître toutes les circonstances de ce phénomène, M. Barlow plaça l'aiguille à l'ouest de la barre, à environ 4 pouces au-dessous de son extrémité supérieure, et à 6 pouces et demi environ de distance. À la chaleur blanche, le barreau n'exerça sur l'aiguille aucune action sensible ; à la chaleur rouge de sang, l'aiguille fut déviée de 70° degrés. En soulevant le barreau de manière que son extrémité fût élevée de 4 pouces au-dessus du plan de la boussole, on obtint d'abord les mêmes résultats que ci-dessus ; mais aussitôt que le bar-

reau, en se refroidissant, fut devenu rouge de sang, l'action fut très-intense; et à une température intermédiaire entre les deux autres, il se produisit une déviation de 4° et demi en sens contraire, laquelle dura environ 2 minutes. La barre ayant été élevée de 6 pouces, la déviation fut alors de 10° et demi, qui resta fixe également pendant 2 minutes; l'aiguille céda ensuite à l'action ordinaire du fer, et fit un mouvement de 81° en sens contraire.

Il résulte de ces expériences que l'action anomale du barreau à la température intermédiaire, entre le rouge blanc et le rouge de sang, présente ce caractère singulier, qu'elle augmente à mesure qu'on élève le barreau au-dessus de l'aiguille, tandis qu'à une basse température, l'action d'une barre de fer dans les mêmes circonstances va toujours en s'affaiblissant.

Si l'on place la boussole à la hauteur du centre de la barre chauffée jusqu'aux températures anomales, il suffit du plus léger déplacement pour que la déviation change de valeur et de signe.

M. Barlow a soumis à l'expérience deux barres en fonte et en fer malléable, chacune de 25 pouces de long, et de 1 pouce $\frac{1}{4}$ de côté, ainsi que deux autres barres de même nature et de même dimension, qui furent constamment maintenues à la température ordinaire pour servir d'étalons. La durée des expériences étai d'un quart d'heure; la chaleur blanche était maintenu pendant 3 minutes; ensuite les actions anomales se manifestaient et transportaient l'aiguille, suivant les cas, à 15, 20, 30 et 50° de sa position naturelle. Deux minutes après, on commençait à observer les effets de l'attraction ordinaire du fer; quelquefois cette attraction atteignait subitement son maximum; dans d'autres elle augmentait graduellement.

On peut consulter le tableau des expériences dans le mémoire de M. Barlow (1).

(1) Philosop. transac., année 1822, p. 124.

On y voit que l'attraction négative était la plus forte là où l'attraction naturelle était la moindre, c'est-à-dire à l'opposé du milieu de la barre ou dans le plan de non attraction.

M. Barlow a fait aussi une expérience avec un boulet de 24 ; mais la chaleur était trop intense pour qu'on pût regarder les observations comme très-certaines. Il a donné néanmoins les nombres suivants :

Attraction froide.........	+ 13° 30′
Chaleur rouge...........	— 3° 30′
Chaleur à blanc..........	0° 0′
Rouge de sang...........	+ 19° 30′

Des barres de cuivre, d'une dimension plutôt plus grande que moindre, ont été chauffées au plus haut degré de chaleur que le métal pouvait supporter. En les approchant de l'aiguille, on n'a pu reconnaître sur elles aucune action appréciable. D'après cela, on ne peut admettre que la chaleur, dans les expériences de M. Barlow, agisse indépendamment du fer auquel elle était appliquée.

M. Barlow, pour expliquer les anomalies qu'il a observées, suppose que, pendant le refroidissement des barreaux, les extrémités où ce refroidissement est plus rapide deviennent magnétiques avant tout le reste du métal, et qu'il en résulte un genre d'action assez complexe. Il avoue néanmoins que cette supposition n'explique pas, d'une manière suffisante, tous les phénomènes observés.

219. M. Kupffer a donné l'explication suivante des actions anomales du fer incandescent. Dans les barreaux faiblement aimantés, les points d'indifférence sont fort rapprochés des extrémités ; or, dans l'expérience de M. Barlow, le magnétisme communiqué au fer doux par l'action de la terre, étant nul au rouge brillant et atteignant son maximum au rouge sombre, il se forme probablement un point d'indifférence à chaque extrémité du bar-

reau. Si cela est, pour peu qu'on éloigne l'aiguille suspendue de ces extrémités, on tombe sur des points qui sont situés au-delà du point d'indifférence, et qui possèdent un magnétisme opposé à celui de l'extrémité même. A la première époque du refroidissement, le magnétisme opposé à celui de l'extrémité doit même augmenter jusqu'à un certain point, d'autant plus que l'on se rapproche davantage du milieu du barreau; mais à mesure que la force du barreau augmente, le point d'indifférence se rapproche du milieu, et tout rentre dans l'ordre des phénomènes ordinaires.

§ II. *De l'influence de la température sur la distribution des aimants.*

220. La question de l'influence de la chaleur sur la distribution du magnétisme libre dans les aiguilles et barreaux aimantés est tellement importante pour la physique terrestre, que plusieurs physiciens en ont fait l'objet de recherches suivies.

Coulomb est le premier physicien qui se soit occupé de cette question (1). Il prit un barreau de fer d'acier, connu dans les arts sous le nom d'acier aux sept étoiles, de 162 millim. de longueur, 14 de largeur, et du poids de 82 grammes. Ce barreau fut chauffé cerise clair et refroidi lentement dans l'air pour qu'il ne prît aucune trempe; il fut aimanté ensuite à saturation, la température de l'air étant à 12°; puis on compta le temps nécessaire pour faire 10 oscillations; on éleva de nouveau la température, et après le refroidissement on mesura de nouveau le temps employé pour faire le même nombre d'oscillations. Voici le résultat des expériences :

(1) Biot. Traité de Physique, t. III, p. 106.

1re SÉRIE.

TEMPÉRATURE.	TEMPS DE 10 OSCILLATIONS.
12.	93°
40.	97,5
80.	104
211.	147
340.	215
510.	290
680.	très-grand.

On retrouve ce principe général, qui a déja été établi, que l'intensité magnétique du barreau diminue à mesure que l'on élève la température.

Pour déterminer la température communiquée successivement au barreau, Coulomb employait une méthode qui exigeait qu'on le plongeât chaud dans de l'eau à 12°. Il a montré que dans cette opération l'acier ne prenait de la trempe que vers 750°. Ainsi, dans un barreau échauffé jusqu'à 700° et refroidi à la manière indiquée, si on l'aimante de nouveau à saturation, il reprend exactement la même force directrice que dans son état parfait de recuit.

Les expériences suivantes montrent que c'est vers 700° que l'effet de la trempe commence à se faire sentir sur le magnétisme du barreau.

2e SÉRIE.

TEMPÉRATURE DE LA TREMPE	TEMPS DE 10 OSCILLATIONS après avoir été de nouveau aimanté à saturation.
780.	78"
860.	64
950.	63

La trempe a presque doublé à 900° la force du magnétisme que le barreau peut prendre, puisque les durées de 10 oscillations ont varié de 93 à 63, et que les forces magnétiques sont en raison inverse du carré des temps.

En augmentant la trempe, les accroissements de la force magnétique sont peu sensibles.

Dans les expériences précédentes, le barreau avait reçu la trempe la plus dure. Si on le ramène successivement à l'état de recuit, et que l'on aimante chaque fois, on a

3ᵉ SÉRIE.

TEMPÉRATURE.	TEMPS DE 10 OSCILLATIONS du barreau, température à 950°.
12.	 63
80.	 66
214 couleur bleue.. . . .	 80
410 couleur d'eau	 170

En comparant ces résultats à ceux de la 1ʳᵉ série, on voit que l'élévation progressive de la température altère beaucoup plus le magnétisme du barreau, lorsqu'il a été d'abord trempé vers 900°, et qu'on le refroidit lentement, que lorsqu'il a été d'abord mis dans l'état de recuit.

Dans l'état de recuit, tant que le barreau n'est exposé qu'à des températures au-dessous de 500°, nous avons vu qu'une nouvelle aimantation lui rend toute sa force primitive; mais dans l'état de trempe il n'en est plus de même, chaque élévation de température diminue sensiblement la force du magnétisme que le barreau peut prendre par une aimantation nouvelle, comme on peut le voir dans le tableau suivant :

TEMPÉRATURE DU RECUIT.	TEMPS DE 10 OSCILLATIONS après une nouvelle aimantation.
	"
12.	63
214.	64,5
410 couleur d'eau. . .	70
900 cerise clair. . . .	93

Le barreau atteint son maximum d'énergie quand il est trempé cerise clair vers 900°, puisqu'il exécute ses 10 oscillations en 63″; à partir de ce terme, la force directrice diminue à mesure que la température du recuit augmente. A 900°, il emploie le même temps pour faire 10 oscillations que dans les premières expériences; ce qui devait arriver, puisqu'il est ramené au même état de recuit parfait où on l'avait pris.

Tous les barreaux employés par Coulomb avaient une longueur égale au plus à 30 fois leur épaisseur; les résultats ont toujours été semblables. Mais il n'en est plus de même quand ils sont plus longs.

Pour le prouver, il prit un fil d'acier très-pur, ayant 326 millim. de longueur, et 4 millim. de diamètre; il le trempa à 820°, l'aimanta à saturation et détermina sa force directrice. Il répéta la même opération en le faisant recuire à différentes températures, et obtint les résultats suivants :

TEMPÉRATURE DU RECUIT.	TEMPS DE 10 OSCILLATIONS.
	"
12°.	 89
320 presque couleur d'eau.	 75
450 rouge sombre. . .	 65
530 rouge moins sombre. .	 70
900 cerise clair. . . .	 76

La trempe roide donne la plus faible force directrice, comme nous l'avons déja vu dans les expériences précédentes. Le maximum d'effet a lieu lorsque le fil est recuit jusqu'à 450°. Ce résultat est général pour les fils et les lames dont la longueur est très-grande relativement à la grosseur.

Dans les barreaux dont la longueur n'excède pas 30 fois le diamètre, il n'existe jamais qu'un seul centre magnétique qui est au milieu; mais lorsque le rapport entre la longueur et le diamètre est plus considérable, l'aimantation produit toujours trois centres, un au milieu, et les deux autres à égales distances des extrémités.

Coulomb a trouvé que les distances de ces centres aux extrémités de la lame varient avec la trempe et le recuit. Voici les observations qu'il a faites sur le fil de 326 millimètres de longueur employé précédemment:

TEMPS DE 10 OSCILLATIONS.	DISTANCES AU MILIEU DU FIL.		
	1er centre.	2e centre au milieu.	3e centre.
89 trempe roide.............	..... 98	...... 0	 98
75 recuit couleur d'eau.......	..... 63	...... 0	 63
68 recuit rouge sombre........	..... 43	...... 0	 43
70 recuit cerise..............	..... 0	...... 0	 0

A mesure que le recuit a augmenté, les deux centres se sont rapprochés, et ils se sont réunis au recuit cerise; après cela, chaque moitié n'a plus possédé qu'un seul magnétisme. Ce dernier résultat est important à connaître, quand on construit des aiguilles de boussole.

221. Coulomb, dans ses expériences, s'est appliqué à déterminer seulement la résultante des effets produits par la chaleur sur le magnétisme libre des barreaux, puisqu'il s'est borné à les faire osciller après leur prépa-

ration, en vertu de l'action de la terre, pour savoir s'ils avaient gagné ou perdu de leur magnétisme.

M. Kupffer a envisagé la question sous un autre point de vue; il a déterminé la quantité de magnétisme libre en différents points d'un barreau, quand on fait varier sa température. Pour savoir si la perte était uniforme sur toute la longueur, il prit un parallélipipède en acier trempé de 503 millim. de long, de 15 $\frac{1}{2}$ de longueur et de 5 millim. d'épaisseur, qu'il aimanta à saturation; il le fit chauffer, le laissa refroidir lentement, et le soumit ensuite à l'expérience.

Il le plaça verticalement, à la manière de Coulomb, à diverses hauteurs, vis-à-vis d'une petite aiguille aimantée, librement suspendue à un fil simple de cocon, et compta combien elle mettait de temps pour exécuter 50 oscillations, dans les diverses positions du barreau. On trouvera dans le tableau ci-joint les résultats obtenus dans quatre séries d'expériences:

PREMIER TABLEAU.

DISTANCE du point situé sur le prolongement de la petite aiguille ou pôle boréal.	DURÉE de 100 oscill.	FORCE magnétique correspondante.
	"	
156,5	260	0,5569
146,5	243	0,6426
136,5	228	0,7374
116,5	202	0,9455
96,5	181	1,1862
76,5	165	1,4311
66,5	159	1,5441
56,5	154	1,6518
46,5	151	1,7195
36,5	150	1,7430
16,5	154	1,6518
6,5	169	1,3657

Le même barreau chauffé jusqu'à 80° et remis en exp. après le refroidissement.

DEUXIÈME TABLEAU.

DISTANCE du point situé sur le prolongement de la petite aiguille ou pôle boréal.	DURÉE de 100 oscill.	FORCE magnétique correspondante.
156,5	291	0,4376
136,5	256	0,5765
116,5	229	0,7280
96,5	208	0,8897
76,5	191 1/2	1,0559
56,5	180 1/2	1,1929

Le barreau fut placé horizontalement, sur son épaisseur, dans le méridien magnétique, à une certaine distance d'une aiguille qui faisait 100 oscill. en 490 ", en vertu de la force terrestre.

TROISIÈME TABLEAU.

DISTANCE de l'extrémité du barreau au centre de l'aiguille.	DURÉE de 100 oscill.	FORCE magnétique correspondante.
m	"	
197	427	0,1777
187	409	0,1975
177	390	0,2213
167	370	0,2505
157	350	0,2849
147	329 1/2	0,3267
137	309	0,3773
127	288	0,4406
117	266	0,5237
107	243 1/2	0,6330
97	221	0,7773
87	198	0,9787
77	174	1,2795

Le barreau chauffé jusqu'à la température de l'eau bouillante, et remis en expérience après le refroidissement.

QUATRIÈME TABLEAU.

DISTANCE de l'extrémité du barreau au centre de l'aiguille.	DURÉE de 100 oscill.	FORCE magnétique correspondante.
197	483	0,1298
177	446	0,1595
157	406	0,2010
137	365	0,2586
117	320	0,3490
97	273	0,4951
77	224	0,7556
67	198	0,9787
57	172	1,3104
47	146	1,8349

Le tableau 2 nous indique que le barreau qui avait donné les résultats consignés dans le tableau 1, ayant été refroidi jusqu'à 80°, puis remis en expérience après le refroidissement, a perdu beaucoup de sa force magnétique; que cette perte n'a pas été uniforme dans toute la longueur du barreau, puisqu'elle a été plus considérable vers les extrémités que sur le milieu; ce dont on peut s'assurer en prenant les forces qui appartiennent à deux mêmes points avant et après le refroidissement et les divi-

sant l'une par l'autre, car on voit que les quotients sont d'autant plus grands que l'on prend des points plus rapprochés des extrémités.

Les résultats consignés dans les tableaux 3 et 4 conduisent aux mêmes conséquences.

222. M. Kupffer a cherché ensuite les changements qui s'opèrent dans la force magnétique d'une aiguille, quand sa température est croissante et qu'elle est maintenue constante pendant la durée de chaque expérience. Ces recherches intéressent particulièrement les observateurs qui s'occupent de la détermination de l'intensité magnétique du globe, à diverses latitudes. Il suffit de suspendre l'aiguille horizontalement et de la faire osciller dans des milieux où la température est constante. L'aiguille que M. Kupffer a employée était d'acier fondu, parfaitement cylindrique, de $0^{m},057$ de longueur et du poids de $2^{gr},395$. Voici quelques résultats de ses expériences (1) :

PREMIER TABLEAU.

TEMPÉRATURE.	DURÉE de 300 oscillations.	HEURE de l'observation.	DATE de l'observation.
8 1/2	777" 1/2	11 1/2 m.	1er mars 1825.
9	778	9 1/2 m.	
9 1/2	778	9 1/2 s.	28 février.
10 1/2	778	9	
13	779 1/2	8 1/2 s.	27 février.
13	779 1/2	1 s.	28 février.
18	781	1 3/4 s.	27 février.

L'intensité de la force magnétique d'une aiguille diminue à mesure que la température s'élève : ce que Coulomb avait déjà observé ; mais il ne l'avait pas remarqué pour des différences de température aussi faibles.

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XXX, p. 113.

Les observations ayant été faites à des heures très-différentes de la journée, on pouvait attribuer les différences aux variations diurnes. Pour se garantir de ces dernières, M. Kupffer a opéré aux mêmes heures.

DEUXIÈME TABLEAU.

HEURE de l'observation.	TEMPÉRATURE.	NOMBRE des oscillations comptées.	DURÉE des oscillations en secondes.	DATE de l'observation.
9 m.	— 1° 1/2	300	791 1/2	7 mars.
9 m.	+ 10	300	797 1/2	8
10 m.	+ 5	300	793	7
10 m.	+ 11 1/2	300	797 1/2	8
2 1/2 s.	+ 26	150	402	7
2 s.	+ 26	300	805	8

Ces observations nous démontrent que les variations diurnes ne contribuent en rien à la diminution du magnétisme de l'aiguille, à mesure que sa température s'élève.

Ces résultats nous mettent à même de déterminer par approximation le rapport qui existe entre la température et la durée des oscillations; en effet, de — $1° \frac{1}{2}$ à 10°, c'est-à-dire dans l'intervalle de $11° \frac{1}{2}$, la durée de 300 oscillations a augmenté de 6″ sur $791'' \frac{1}{2}$; de même, de — $1° \frac{1}{2}$ à 26°, c'est-à-dire dans un intervalle de $27° \frac{1}{2}$, la durée du même nombre d'oscillations a augmenté de $13 \frac{1}{2}$. En comparant ces deux rapports, on voit que dans l'intervalle de 0° à 30°R, chaque degré de chaleur augmente à peu près d'une demi-seconde la durée de 300 oscillations de l'aiguille. Rien n'est plus simple que de réduire à la même température, à celle de 10° par exemple, les observations précédentes, qui expriment la durée de 300 oscillations. Voici les valeurs obtenues :

1er tabl. $778 \frac{1}{4}$, $778 \frac{1}{2}$, $778 \frac{1}{4}$, $777 \frac{3}{4}$, 778, 778, 777.
2e tabl. $797 \frac{1}{4}$, $797 \frac{1}{2}$, $795 \frac{1}{2}$, $796 \frac{3}{4}$, 796, 797.

223. Pour déterminer la loi du décroissement des forces magnétiques à des températures plus élevées que 30°, M. Kupffer a placé un barreau récemment aimanté, de 0,5 de longueur, parallèlement au-dessous d'une aiguille librement suspendue, les pôles inverses en regard. Cette aiguille, abandonnée à elle-même, exécutait 300 oscillations en 762" à 13°R : en présence du barreau, elle n'employait que 429".

Le barreau a été plongé dans de l'eau contenue dans une cuvette de cuivre rouge, dont la température a été portée successivement jusqu'à 80°; on a compté chaque fois le temps nécessaire pour exécuter 300 oscillations, puis on a laissé refroidir, et on a compté de nouveau, pour connaître les changements apportés dans la distribution du magnétisme par l'effet du refroidissement.

TEMPÉRATURE DU BARREAU.	DURÉE DE 100 OSCILLATIONS.
13°.	. . . . 429"
80	 476
21	. . . . 464 1/2
13	 463
11	. . . . 462 1/2

Ces observations prouvent encore que l'intensité des forces magnétiques diminue avec la chaleur, et qu'un barreau aimanté à la température de 13°, chauffé jusqu'à 80°, puis refroidi jusqu'à 13°, ne reprend plus son premier état magnétique, qui se trouve diminué; résultat que nous avions déja observé précédemment, et qu'il était facile de prévoir, puisque le barreau, en se refroidissant lentement, perd de sa trempe et par suite une portion de son magnétisme libre.

224. Représentons par p l'intensité de la force magnétique du barreau à 13°, après le refroidissement, en prenant pour unité celle du même barreau à 13° avant l'élévation de température, et par q l'intensité de la force à 80°, celle de 13 étant prise aussi pour unité; si l'on divise 300 par 429″ et qu'on élève au carré, on aura la force qui a sollicité l'aiguille au commencement de l'expérience; cette force se compose de celle du barreau aimanté et de la force magnétique de la terre : il faut donc retrancher de ce nombre l'expression de la force terrestre qui est égale au carré de $\frac{300}{742}$; 742 étant la durée de 300 oscillations exécutées par l'aiguille aimantée quand elle est abandonnée à elle-même. Si l'on substitue 463 à 429″, on a la force qui est restée au barreau, après que sa température a été portée à 80°. On trouve que la force exercée par le barreau à 13 degrés étant représentée par 1, $p = 0{,}787487$, $q = 0{,}91111771$. Cet exemple suffit pour montrer comment on peut déterminer la force d'aiguilles aimantées dont on fait varier la température et qu'on laisse ensuite refroidir lentement. Nous avons vu précédemment que dans l'intervalle de 0 à 30°, la durée de 300 oscillations augmente de 0″,5 pour chaque degré de chaleur; il s'agit actuellement de déterminer les accroissements de la durée dans l'intervalle de 0 à 80°.

M. Kupffer a remarqué dans un tableau d'observations que nous ne rapportons pas ici, que les accroissements de la durée de 300 oscillations sont en raison simple des accroissements de la température; et comme dans cet intervalle les accroissements de la durée sont à peu près en raison inverse des accroissements des forces, il en déduit la loi que l'intensité de la force d'un barreau aimanté diminue par la chaleur, de manière que ces décroissements sont en raison simple des accroissements de la chaleur. Ainsi la durée de 300 oscillations étant de 798″ à 13°, elle sera de 831″ à 80°.

Soit C la force exercée par le globe sur l'aiguille oscillante, soit x le nombre de secondes que cette aiguille emploie pour faire n oscillations à 13° R, Soient F la force

exercée par le barreau à la même température, x' le nombre de secondes que la même aiguille emploie pour faire n oscillations à la température t.

M. Kupffer a trouvé, en donnant à q la même désignation que ci-dessus,

$$x = \frac{n}{\sqrt{C+F}}$$

$$x' = \frac{u}{\sqrt{\left(C+F-\frac{(1-q)^F}{67}\right)(t-13.)}}$$

Cette formule représente avec une grande exactitude les résultats de l'expérience (1).

225. Il était intéressant aussi d'examiner les changements qui s'opèrent dans la distribution du magnétisme d'un barreau, lorsque l'on échauffe seulement une de ses extrémités. Pour observer ce phénomène, on place un barreau aimanté à côté et parallèlement à une aiguille suspendue horizontalement, les pôles inverses en regard. L'aiguille ne reste dans le méridien magnétique qu'autant que son point d'indifférence et celui du barreau se trouvent sur la même ligne perpendiculaire à l'aiguille. Quelques essais suffisent pour trouver cette position. Pour peu que le point d'indifférence se rapproche de l'un des pôles de l'aiguille, quand on dérange le barreau, toujours dans la même direction, ce pôle se trouve repoussé, parce que le pôle opposé de l'aiguille est plus fortement attiré par le pôle correspondant du barreau qui s'est rapproché, tandis que l'autre s'est éloigné.

Supposons que l'on ait chauffé le pôle boréal du barreau, le pôle austral de l'aiguille qui était en regard a été aussitôt attiré; ce fait prouve que le point d'indifférence s'est éloigné du pôle chauffé, ou du pôle dont la force magnétique a diminué : ce qui est conforme à la

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. xxx, p. 126.

loi de Coulomb. Les observations suivantes prouvent la vérité de ce que je viens d'avancer. Le barreau soumis à l'expérience avait 0,5 de longueur. Il fut placé dans le même plan horizontal que l'aiguille, et à peu près à égale distance de ses extrémités, son pôle boréal situé vers le pôle austral de l'aiguille, et réciproquement; l'aiguille se trouvait dans le méridien magnétique. Chaque fois qu'on élevait la température de l'une de ses extrémités, le pôle de l'aiguille qui se trouvait du côté de cette extrémité était attiré, et l'aiguille s'éloignait du méridien magnétique d'un certain angle. En abandonnant ensuite le barreau au refroidissement spontané, l'aiguille se rapprochait peu à peu de sa première position, sans jamais y revenir entièrement. Le barreau ayant été incliné légèrement, on mit sa partie basse dans un vase rempli de neige, dont on élevait successivement la température jusqu'à 50°. L'aiguille soumise à l'action seule de la terre faisait 50 oscillations en 207″. Voici les résultats observés :

TEMPÉRATURE de l'extrémité du barreau.	DURÉE DE 100 OSCILLATIONS.
	″
0	275 1/2
13	276
40	278
56	279 1/2
15	277 1/2
11	277

Si l'on opérait avec une barre de fer doux forgé, placée parallèlement à une aiguille horizontale, de manière que celle-ci ne sortît pas du méridien magnétique, la barre se trouvait aimantée par l'action du magnétisme terrestre. En chauffant le barreau à l'une de ses extrémités, le pôle de l'aiguille qui se trouvait de ce côté était attiré au lieu

d'être repoussé, comme dans le cas où la barre était aimantée; ainsi donc, dans le cas du fer doux aimanté par l'action de la terre, le point d'indifférence s'est rapproché de l'extrémité chauffée, au lieu de s'en éloigner comme dans le cas d'un aimant. La force magnétique du fer doux augmente donc par la chaleur.

226. M. Christie (1) s'est occupé aussi de la question relative aux changements qu'éprouve l'intensité magnétique des barreaux, quand on fait varier leur température; mais la méthode analytique dont il a fait usage n'est pas aussi simple que celles qui ont été employées par Coulomb et M. Kupffer; nous allons cependant essayer d'en donner une idée.

M. Christie est parti du principe que les actions exercées par deux aimants sur un troisième librement suspendu, peuvent être rapportées à celles de deux centres placés dans chacun d'eux, près de leurs extrémités, et que pour chaque pôle de l'un des aimants, les autres pôles de l'autre sont, l'un attiré, et l'autre repoussé par lui, avec une énergie qui varie en raison inverse du carré des distances. Il a établi une formule dans laquelle se trouvent l'intensité des barreaux et les écarts de l'aiguille, et au moyen de laquelle on peut déterminer les variations de l'intensité en raison de la température.

Voici comment est disposé l'appareil dont il a fait usage:

Il a commencé par établir une ligne méridienne sur une table solidement établie, et a placé dessus une boussole, de manière que l'extrémité de l'aiguille correspondît au zéro de l'échelle. Deux aimants, les pôles inverses en regard, furent mis au fond de deux vases de terre, fixés aussi à la table avec des pièces de bois rectangulaires. De ces pièces de bois sortaient de petites lames de cuivre, sur chacune desquelles était tracée une ligne indiquant la position de l'axe de l'aimant. La distance horizontale

(1) Philos. transact., 1825, 1re part.

de l'extrémité saillante de chacune de ces lames à celle de l'aimant placé dans le vase était de trois pouces. On pouvait donc déterminer exactement la distance du centre de l'aimant à celui de l'aiguille. Les lignes de repère des lames coïncidaient avec la méridienne. Les vases ayant été remplis d'eau, les aimants durent prendre sa température, qui était accusée par un thermomètre dont la boule reposait sur le pôle de l'aimant qui était le plus rapproché du centre de l'aiguille.

Après avoir déterminé les températures, il observa, dans la direction de l'ouest, à quel point l'aiguille était maintenue en équilibre par l'action simultanée de la terre et des deux aimants; puis, au moyen d'un aimant très-faible présenté convenablement, il amena l'aiguille jusqu'au point d'équilibre situé à l'est. Il employa le même procédé pour l'amener au point sud, et nota en même temps la température de l'aimant sud.

Il élevait ou abaissait la température des vases par l'addition d'une nouvelle quantité de liquide, et laissait s'écouler tout le temps convenable pour que les aimants prissent la température de l'eau.

Les températures étaient observées avec le thermomètre de Fahrenheit.

Parmi les résultats que M. Christie a obtenus, nous rapporterons la série qui suit :

TABLEAU

Des intensités magnétiques correspondantes aux différentes températures des aimants.

TEMPÉRATURE moyenne des aimants.	DIFFÉRENCE de tempér. des observations successives.	INTENSITÉ magnetique.	VARIATION de l'intensité pour 1° Fahr.
62°,05		212,5620	
59,05	− 3,00	212,9423	0,1268
77,65	+ 18,60	210,6228	0,1247
74,00	− 3,65	210,9892	0,1004
70,65	− 3,35	211,4178	0,1279
67,15	− 3,50	211,8358	0,1193
63,83	− 3,35	212,2167	0,1138
62,05	− 1,75	218,4610	0,1413

La dernière colonne comprend les variations de l'intensité magnétique pour un degré Fahrenheit, de 59°,05 à 77°,05. D'après des considérations que je ne puis rapporter ici, M. Christie adopte le nombre 0,1226, comme représentant la variation moyenne de l'intensité des aimants dans le changement de température de 1 degré entre les limites indiquées.

M. Christie a reconnu que dans des aimants qu'il a soumis à l'expérience, et dont l'intensité était 218 à la température de 60°, un changement de 1° en occasionait un de 0,123 dans leur intensité. En supposant donc l'intensité des aimants égale à 1, chaque degré d'accroissement dans la température produirait une diminution dans l'intensité de 0,000564.

Ce physicien fait observer que si la même chose a lieu pour tous les aimants, il devient indispensable, dans tous les cas où l'on veut déduire l'intensité magnétique de la terre des oscillations d'une aiguille, d'opérer à la même température, ou du moins de faire les corrections nécessitées par les différences de température. Il ajoute qu'il ne croit pas qu'on ait imaginé avant lui de faire cette correction.

Il déduit aussi de plusieurs expériences faites avec la balance de Coulomb les faits suivants : depuis la température de — 3° F. jusqu'à celle de + 127, l'intensité des aimants a été en diminuant à mesure que l'on a élevé leur température. En abaissant la température avec le sulfure de carbone, dans le vide, l'intensité a été en croissant, jusqu'au point le plus bas où la température fut amenée.

Pour une certaine augmentation de température, la diminution de l'intensité n'est pas constante à tous les degrés du thermomètre; mais cette différence croît avec la température.

Partant de 80°, à mesure que la température s'élève, l'intensité décroît très-rapidement; de telle manière que si jusqu'à cette température les différences des décroissements sont à peu près constantes, au-delà de cette

température ces différences elles-mêmes vont en augmentant.

Au-delà de 100°, l'aimant perd pour jamais une partie de sa puissance.

Quand la température change, la plus grande partie de l'effet qu'exerce ce changement sur l'intensité de l'aimant a lieu d'une manière instantanée; ce qui prouve que la puissance magnétique réside à la surface. Ce phénomène est surtout remarquable quand on élève la température; quand on l'abaisse au contraire, quoique le principal effet ait lieu d'une manière instantanée, l'aimant semble continuer pendant quelque temps à gagner de la force.

Les effets produits par les changements de température sur le fer non polarisé, sont précisément inverses de ceux qu'ils produisent sur un aimant. M. Christie a observé, entre les limites de 50° à 100°, qu'une augmentation de température produisait une augmentation de force dans la puissance magnétique du fer. Ce fait lui paraît un argument contre l'hypothèse que l'action du fer sur l'aiguille vienne de la polarité qui lui est communiquée par la terre.

Il m'est impossible de donner plus d'étendue à l'exposé des recherches qui ont été faites jusqu'ici pour découvrir les effets de la chaleur sur le magnétisme libre des barreaux aimantés; le plan que je me suis tracé en commençant cet ouvrage m'impose l'obligation de ne pas entrer dans de plus grands développements à cet égard.

CHAPITRE VII.

DE L'ACTION DES AIMANTS SUR TOUS LES CORPS EN REPOS.

§ Ier. *De l'action des aimants sur tous les corps en repos.*

227. Avant Coulomb, les physiciens avaient fait de vains efforts pour reconnaître des traces de magnétisme dans tous les corps de la nature : aussi furent-ils fort étonnés d'apprendre qu'en 1802 cet illustre physicien venait de communiquer à l'Académie des Sciences une série d'expériences qui montraient que tous les corps jouissaient de la propriété magnétique à des degrés plus ou moins marqués.

Pour observer le magnétisme de tous les corps, il faut donner à chacun d'eux la forme d'un cylindre ou d'un petit barreau de 7 à 8 millimètres de longueur et $\frac{3}{4}$ de millimètre d'épaisseur (pour les métaux cette épaisseur doit être 3 fois moindre), les suspendre à un fil de soie tel qu'il sort du cocon, et les placer entre les pôles opposés de deux barreaux aimantés. Les barreaux d'acier sont placés sur la même ligne, les pôles opposés, qui sont en regard, sont éloignés l'un de l'autre de 5 à 6 millimètres de plus que la longueur de l'aiguille qui oscille entre eux. Les petites aiguilles, quelle que soit leur nature, se placent toujours dans la direction des deux barreaux. Si on les détourne de cette direction, elles y reviennent toujours après un certain nombre d'os-

cillations, dont le nombre est souvent de plus de 30 par minute. Le poids et la figure des aiguilles étant donnés, il est facile de déterminer la force qui produit les oscillations. Coulomb ne voulut pas se prononcer sur la cause du phénomène : il se demanda si elle était magnétique, ou si on devait l'attribuer à la présence de quelques particules de fer répandues indistinctement dans tous les corps, et qui ne pouvaient être rendues sensibles par les analyses chimiques.

Or, comme aucun corps n'échappe à l'action attractive de forts barreaux, il fallait donc admettre que tous les corps, sans exception, renfermassent du fer.

Les aimants artificiels dont il a fait usage étaient formés chacun de quatre barreaux d'acier trempés à blanc, de 360 millimètres de longueur et de 4 millimètres d'épaisseur. Ayant fait d'abord osciller chaque aiguille hors de l'influence des aimants, il détermina la force de torsion du fil par le nombre d'oscillations qu'elle faisait dans cette position; puis il la fit osciller lorsqu'elle était placée entre les pôles des aimants, pour avoir la force réunie de la torsion et de la force magnétique; en retranchant les carrés des nombres d'oscillation, il obtenait seulement l'action magnétique.

Pour préserver les aiguilles des agitations de l'air, Coulomb employait une cloche de verre AA (fig. 94 *bis*) percée par le haut, et surmontée d'un tube AB, dont l'extrémité supérieure était fermée par un bouchon de liége qui pouvait monter et descendre à volonté. Ce bouchon était traversé par une tige de bois ou de métal à laquelle était attaché le fil de cocon, dont l'extrémité inférieure portait un anneau de papier très-fin dans lequel il plaçait la petite aiguille. La cloche était placée sur les pôles *n*, *s*, des deux aimants, dirigés sur la même ligne.

Les aiguilles de métal soumises à l'expérience avaient 7 milli. de longueur, et pesaient 40 milligrammes. Hors de l'influence des aimants, elles faisaient 40 oscillations

en 44 secondes. Descendues entre les pôles des aimants, elles exécutaient :

Pour l'or........	4	oscillations en 22″
Pour l'argent.....	4	.... en 20
Pour le plomb....	4	.... en 18
Pour le cuivre.....	4	.... en 22
Pour l'étain	4	.... en 19

Il en déduisit le rapport du moment de la force magnétique de chacun de ces métaux par la méthode que nous avons fait connaître :

Pour l'or.................	= 3,00.
Pour l'argent..............	= 3,80.
Pour le plomb..............	= 4,97.
Pour le cuivre.............	= 3,00.
Pour l'étain...............	= 4,24.

Ces résultats obtenus, Coulomb a cherché à déterminer la quantité de fer qui peut être alliée avec un autre métal, lorsque la rapidité des oscillations produites par un seul barreau aimanté sur une lame tirée de ce corps est un signe qu'il renferme du fer en quantité, cependant si petite, qu'il est difficile de l'apprécier par les moyens ordinaires. Il expérimenta d'abord avec un culot d'argent, séparé par la fonte d'un culot de fer; le barreau aimanté agissait sensiblement sur cet argent, qui, dissous dans l'acide nitrique et précipité par le prussiate de soude, ne donna pas la plus petite nuance de bleu. Coulomb pensa néanmoins qu'il devait s'y trouver du fer, et employa le moyen suivant pour découvrir le rapport du fer à l'argent.

Il forma avec de la cire trois cylindres pesant chacun 212 milligrammes, et de 23 millimètres de longueur : dans le premier il introduisit en limaille de fer le quart du poids de la cire; dans le deuxième, le huitième; et dans le troisième, le seizième. Les pôles des deux ai-

mants ayant été mis à 100 millimètres de distance l'un de l'autre, il trouva que

Le premier cylindre faisait	40	oscillations en	32″
Le deuxième	40	....	43″
Le troisième	40	....	61″

Coulomb chercha le rapport des forces accélératrices qui faisaient osciller chaque aiguille, et il en conclut que l'action des pôles était proportionnelle à la quantité de limaille que contenaient les cylindres de même longueur formés avec ce mélange. De cette expérience et d'autres que nous ne rapportons pas ici, il en tira la conséquence que, malgré la quantité infiniment petite du fer, relativement à celle de l'argent pur, ce fer était tellement disséminé dans l'argent, que chaque atome de la masse contenait une partie proportionnelle de fer que l'on pouvait déterminer au moyen des oscillations, et qui ne pouvait être rendue sensible par les réactifs chimiques. Ce célèbre physicien a reconnu en outre, sans donner des mesures exactes, que la plus grande partie des matières animales et végétales paraissent éprouver une plus grande influence de la part des barreaux magnétiques, que les métaux purifiés par la méthode ordinaire.

*228. M. Biot s'est servi du procédé de Coulomb pour découvrir de très-petites quantités de fer dans les minéraux, par exemple dans deux espèces de mica différentes, l'une qui venait de Sibérie, et l'autre de Zinwald en Bohême.

Ayant coupé plusieurs lames rectangulaires de même dimension, il les fit osciller chacune séparément entre deux forts barreaux. La lame de mica de Zinwald exécuta 12 oscillations en 55 secondes, tandis que l'autre n'en fit que 7 dans le même temps. Les forces magnétiques étaient donc entre elles comme les carrés de ces nombres, c'est-à-dire comme 144 : 49. En considérant ces forces comme proportionnelles aux quantités d'oxide

de fer combinées, le mica de Zinwald devait contenir 20 centièmes de cet oxide, et l'autre 6,8. Ce résultat s'accorde avec celui de l'analyse chimique.

Ce procédé peut être employé avec avantage pour déterminer approximativement la quantité de fer qui est contenue dans un minéral; mais comme le nombre d'oscillations dans le même temps est quelquefois plus considérable avec certains corps qu'avec les lames de mica, bien que l'analyse ne reconnaisse pas dans ces corps la présence du fer, on doit se tenir en garde contre de semblables indications qui peuvent induire en erreur.

229. Pour analyser les phénomènes magnétiques développés dans tous les corps par l'influence d'aimants très-énergiques, il faut suivre une marche particulière, qui va nous montrer d'autres effets que ceux qui ont été découverts par Coulomb.

M. Haüy a imaginé un procédé qu'il a nommé le *double magnétisme*, à l'aide duquel il est parvenu à découvrir de petites quantités de fer dans les minéraux. Ce procédé consiste à faire prendre à une aiguille aimantée une direction perpendiculaire à celle qu'elle a ordinairement. On place pour cela, dans le plan horizontal de l'aiguille et dans sa direction, un petit barreau aimanté, avec la condition que les pôles de même nom soient en regard : alors, en approchant lentement le barreau de l'extrémité de l'aiguille, celle-ci se dévie de sa direction et finit par en prendre une qui lui est perpendiculaire. Ces effets résultent des actions combinées des pôles du barreau et de ceux de la terre sur le magnétisme de l'aiguille. Dans cette position, il faut une action très-faible pour que l'aiguille pirouette, c'est-à-dire pour que son pôle austral vienne se placer vis-à-vis du pôle boréal du barreau.

Si l'on agit sur l'aiguille avec un barreau aimanté qui n'est plus dans son plan, et mettant en regard les pôles de nom contraire, elle ne change pas de direction tant que le point de suspension est en dehors du bar-

reau et à une distance convenable; mais il n'en est plus de même quand la distance change, car elle tend continuellement à se placer perpendiculairement à la ligne des pôles. Tous ces effets peuvent être facilement calculés, mais nous allons donner ceux que nous avons déduits de l'expérience.

Le barreau aimanté qu'on a employé était formé de six barreaux jointifs, de 8 décimètres de long chacun et de 2 centimètres de large.

L'aiguille a été placée à diverses hauteurs en dedans et en dehors du barreau, et l'on a cherché pour chacune d'elles la distance horizontale du point de suspension, qui est toujours sur la ligne des pôles, à l'extrémité la plus voisine, pour que sa direction fût perpendiculaire à cette ligne. On a eu dans ce cas les résultats suivants:

DISTANCES VERTICALES du centre de suspension au barreau.	DISTANCES HORIZONTALES du centre de suspension à l'extrémité, pour que l'aiguille prenne la position perpendiculaire.
mill.	mill.
100	60 en dedans.
150	55
200	46
250	23
300	12
350	45 en dehors.
400	82

On voit donc que, lorsque le centre de suspension est au-dessus du barreau, il faut, pour obtenir la position perpendiculaire, augmenter la distance verticale et diminuer la distance horizontale, tandis que ces distances augmentent toutes deux quand le centre est en dehors.

Le sens de la déviation dépend de causes accidentelles; souvent un simple mouvement dans l'appareil le détermine.

Quand l'aiguille est perpendiculaire à la ligne des pôles, si l'on continue à porter en avant le centre de suspension, elle reprend sa direction primitive, comme on devait s'y attendre.

En substituant à l'aiguille aimantée une aiguille de fer doux, on trouve des résultats absolument semblables à ceux que je viens d'exposer; il n'y a de différence que dans l'intensité des phénomènes. Jusqu'ici il n'y a aucun phénomène nouveau, et tous les effets décrits peuvent être déduits du calcul.

Au lieu d'une aiguille aimantée ou de fer doux, opérons avec une petite cartouche de papier remplie de deutoxide de fer, ou d'un mélange de deutoxide et de tritoxide. Avec le deutoxide, les effets seront les mêmes qu'avec l'acier; mais il n'en sera plus ainsi quand la petite cartouche renfermera un mélange de deutoxide et de tritoxide, dans la proportion de 1 à 30.

Si l'on place le centre de suspension le plus près possible de l'extrémité boréale du barreau et sur la ligne des pôles, la cartouche se mettra immédiatement dans une direction perpendiculaire à cette ligne, au lieu de se diriger dans son sens, comme le ferait une aiguille de fer doux. Si on l'écarte de cette direction, elle y reviendra par une suite d'oscillations, dont la vitesse dépendra de la quantité de deutoxide. Il résulte de là, que tout le magnétisme austral de la cartouche est situé sur la partie qui regarde le barreau, tandis que le magnétisme boréal est de l'autre côté, comme on peut le voir en promenant une petite aiguille aimantée tout le long de la cartouche. Cette distribution du magnétisme est impossible dans le fer doux ou l'acier trempé.

Maintenant, si l'on porte le centre de suspension en dedans du barreau, la cartouche se dévie de la position qu'elle avait d'abord, et tend à se mettre dans le sens

de la ligne des pôles; ainsi l'effet est tout-à-fait contraire à celui que donne l'aiguille aimantée ou l'aiguille de fer doux.

DISTANCES verticales du centre de suspension au barreau.	DISTANCES horizontales du centre de suspension à l'une des extrémités du barreau.	DÉVIATIONS de la cartouche par rapport à la direction perpendiculaire à la ligne des pôles.
10 mill.....	5	 24
	10	 44
	15	 60
	20	 73
	25	 78
	30	 84
20 mill.....	5	 50
	10	 65
	15	 73
	20	 77
	30	 32
30 mill.....	5	 70
	20	 76
	30	 82

Le magnétisme transversal qu'acquiert la cartouche est permanent pendant quelque temps, quelque petite que soit la quantité de deutoxide qu'elle renferme. Il doit résulter de là des effets composés, quand on varie les distances, puisqu'il se forme alors de nouveaux pôles.

230. Remplissons la cartouche avec du tritoxide très-pur, tel que celui que l'on retire du nitrate de fer par la calcination : l'effet est alors bien plus faible que lorsque le tritoxide renferme une petite quantité de deutoxide. En plaçant le point de suspension très-près de l'une des extrémités du barreau, la cartouche se met encore dans une direction perpendiculaire à la ligne des pôles; mais

si l'on porte ce point en dedans ou en dehors du barreau, en faisant varier en même temps la distance verticale, la cartouche se dévie de sa direction primitive, sans cependant se mettre dans une direction perpendiculaire à celle qu'elle prend ordinairement, quand le centre de suspension est très-rapproché de l'extrémité. Il serait possible d'atteindre la direction perpendiculaire, en employant des barreaux plus forts que ceux dont on a fait usage.

DISTANCES verticales du point de suspension au barreau.	DISTANCES horizontales du point de suspension à l'extrémité du barreau.	DÉVIATIONS par rapport à la direction perpendiculaire à la ligne des pôles.
	en dehors du barreau.	
5 mill......	5	..... 25°
	10	 34
	15	 48
	20	 55
	25	 70
10 mill....	5	 32
	10	 37
	15	 43
	20	 46
	25	 40
	en dedans du barreau.	
5 mill......	10	 26
	15	.....
	20	 45
	25	 51
10 mill....	10	 20
	15	 30
	20	 45
	25	 50

Dès l'instant que le tritoxide de fer renferme une très-petite quantité de deutoxide, la vitesse des oscillations augmente d'une manière assez forte : par exemple, si l'on prend deux cartouches parfaitement égales, dont l'une soit remplie de tritoxide, et l'autre de tritoxide mélangé avec $\frac{1}{30}$ de deutoxide, la première fera 12 oscillations en 30 secondes, autour de la direction perpendiculaire à la ligne des pôles, tandis que l'autre en produira 25 dans le même temps. Cette différence dans les résultats suffit pour montrer que l'on peut se servir de ce procédé, pour déterminer la quantité de deutoxide de fer qui peut être renfermée dans du tritoxide.

231. Substituons maintenant aux cartouches des aiguilles de bois, de gomme laque et d'autres substances qui ont encore un magnétisme plus faible que le tritoxide de fer; rapprochons les distances pour rendre les effets plus sensibles.

Plaçons une aiguille de bois blanc, de 4 centimètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, au-dessus de l'intervalle entre les pôles opposés de deux barreaux, lequel est de 3 ou 4 millimètres; le point de suspension étant le plus rapproché possible des barreaux, l'aiguille viendra se placer perpendiculairement à la ligne des pôles, au lieu de se mettre dans sa direction, comme l'a observé Coulomb, quand les extrémités des barreaux sont à une certaine distance l'une de l'autre : ainsi, dans la position où elle a été mise, elle s'est comportée comme la cartouche qui renferme un mélange de deutoxide et de tritoxide de fer, ou seulement du tritoxide. Mais si on éloigne peu à peu les extrémités, elle finit par se remettre dans la ligne des pôles; aussi trouve-t-on les résultats suivants :

DISTANCES des extrémités des barreaux.	DÉVIATIONS.
mill. 10	18
20	36
30	56
«	»

Lorsque les deux barreaux sont très-rapprochés l'un de l'autre, et que l'aiguille est perpendiculaire à la ligne des pôles, si on la retire de cette position et qu'on la maintienne pendant quelques instants dans le sens de cette ligne, elle y reste; mais le moindre mouvement la fait revenir dans sa direction primitive, qu'elle prend de préférence à l'autre.

En ne se servant que d'un seul barreau, et plaçant l'aiguille de bois précisément vis-à-vis de l'une de ses extrémités et le plus près possible de la ligne qui la termine, elle se dirige encore perpendiculairement à la ligne des pôles; mais si le point de suspension, restant toujours sur cette ligne, on l'avance en dedans du barreau, l'aiguille se dévie de sa direction, sans cependant atteindre jamais 90°.

DISTANCES du centre de suspension à l'extrémité du barreau.	DÉVIATIONS DE L'AIGUILLE DE BOIS.
mill. 5	12
10	18
15	»

Au-delà de 10 millimètres, les déviations augmentent

insensiblement et d'une manière irrégulière, de sorte qu'il est impossible de les apprécier.

En résumé, on voit que les effets magnétiques produits par l'influence d'un fort barreau aimanté, dans l'acier trempé ou le fer doux, diffèrent essentiellement de ceux qui ont lieu dans tous les corps où le magnétisme est très-faible. Dans les premiers, quelles que soient leurs positions respectives et par conséquent leurs directions, la distribution du magnétisme s'y fait toujours dans le sens de la longueur, à l'exclusion de toute autre direction, tandis que dans le tritoxide de fer, le bois, la gomme laque, elle a lieu dans un sens qui dépend de la distance du corps aux pôles de l'aimant, de sorte que cette distribution varie avec la direction que l'aimant fait prendre au corps, en raison de l'action qu'il exerce sur lui.

§ II. *Action de tous les corps sur l'aiguille aimantée pour diminuer l'amplitude des oscillations sans changer leur nombre.*

232. Nous venons de voir que tous les corps, placés en présence d'aimants très-puissants, manifestent de faibles propriétés magnétiques, que l'on peut attribuer aussi bien à de petites quantités de fer, que l'art n'a pu découvrir jusqu'ici dans leurs parties constituantes, qu'à la nature même de ces parties. Nous allons actuellement nous occuper d'autres propriétés magnétiques, essentiellement différentes des premières, que l'on fait naître momentanément par le mouvement dans ces mêmes corps. M. Arago fut conduit à cette découverte importante en faisant osciller une aiguille aimantée au-dessus ou près de corps d'une nature quelconque. Si l'on suspend une aiguille aimantée horizontalement au-dessus d'un métal ou sur de l'eau, et qu'on l'écarte de sa position naturelle d'un certain nombre de degrés, en l'abandonnant ensuite à elle-même, elle oscille dans des arcs de moins en moins étendus, comme si elle se

trouvait dans un milieu résistant. Ce qu'il y a de remarquable dans ce mode d'action, c'est que la diminution dans l'amplitude des oscillations ne change pas leur nombre dans le même temps.

Donnons quelques exemples avec l'eau, la glace et le verre, comme l'a fait M. Arago. Pour fixer les idées, saisissons l'instant où la demi-amplitude n'est plus que de 43°, et comptons combien il s'effectue d'oscillations depuis le départ.

La distance de l'eau à l'aiguille étant de 0 mil. 65, il se perd 10° en................ 30 oscillations.

A 52 mil. 2 de distance, il faut pour la même perte................... 60 oscillations.

Ainsi, selon que l'aiguille est à 0 mil. 65 ou à 52 mil. 2 de distance de la surface de l'eau, elle perd 10° dans l'amplitude de ses oscillations en 30 ou en 60 oscillations; la différence, comme on voit, est du double. M. Arago a obtenu les résultats suivants en plaçant la même aiguille sur de la glace :

De 53° à 43°, à 0 mil. 70 de dist. 26 oscill.
De 53° à 43°, à 1 mil. 26 de dist. 34 oscill.
De 53° à 43°, à 30 mil. 5 de dist. 56 oscill.
De 53° à 43°, à 52 mil. 2 de dist. 60 oscill.

Sur un plan de verre (crown-glass) avec une autre aiguille.

De 90° à 41°, à 0 mil. 91 de distance, il s'écoule........................ 122 oscill.
De 90° à 41°, à 0,99 180
De 90° à 41°, à 3,04 208
De 90° à 41°, à 4,01 221

Les plans de métal ont donné des résultats semblables; mais néanmoins M. Arago a remarqué que les métaux qui agissent avec plus d'énergie que le verre, le bois, etc., ont un mode d'action qui diffère de celui

de ces substances. Tous ces résultats mettent en évidence le principe énoncé ci-dessus, savoir : que tous les corps qui se trouvent près d'une aiguille aimantée qui oscille, exercent sur elle une action dont l'effet est de diminuer l'amplitude des oscillations sans altérer leur nombre. Cette découverte a été annoncée par M. Arago à l'Académie des sciences de Paris, le 22 novembre 1824.

233. M. Seebeck, immédiatement après la découverte de M. Arago, répéta l'expérience en faisant osciller une aiguille de 2 pouces $\frac{1}{8}$ de longueur, à 3 lignes de distance au-dessus de plaques de diverse nature, et compta le nombre des oscillations nécessaires dans chaque cas, pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10°. Voici les résultats qu'il a obtenus :

Nombre des oscillations.	Épaisseur des plaques.	Substances.
116	0,0 lig.	Marbre.
112	2,0	Mercure.
106	2,0	Bismuth.
94	0,4	Platine.
90	2,0	Antimoine.
89	0,75	Plomb.
89	0,2	Or.
71	0,5	Zinc.
68	1,0	Étain.
62	2,0	Laiton.
62	0,3	Cuivre.
55	0,3	Argent.
6	0,4	Fer.

Nous ferons observer que M. Seebeck n'a pas opéré avec des plaques ayant les mêmes dimensions ; ainsi il est impossible de tirer aucune induction de tous ces résultats. A la vérité, plusieurs d'entre elles ont la même épaisseur ; mais comme le rayon n'est pas donné, on se trouve toujours dans le vague.

M. Seebeck a avancé qu'en alliant des substances

magnétiques avec d'autres qui ne le sont pas, on forme des composés qui n'exercent aucune action sur l'aiguille aimantée. Il cite particulièrement les alliages de quatre parties d'antimoine et d'une de fer ; de deux parties de cuivre et d'une de nickel.

§ III. *Des phénomènes magnétiques produits dans tous les corps par la rotation.*

234. M. Arago, ayant observé qu'une plaque de cuivre, ou de toute autre substance solide ou liquide, placée au-dessous d'une aiguille aimantée, jouissait de la propriété de diminuer l'amplitude des oscillations sans changer sensiblement leur durée, eut l'idée d'essayer si cette même aiguille ne serait pas entraînée par une plaque en mouvement. La conséquence était naturelle : l'expérience vint confirmer ses prévisions, et la physique s'enrichit alors d'un fait capital par les résultats importants qui en découlent.

Commençons par décrire l'appareil, fig. 95, qui a servi à observer l'action d'une plaque en mouvement sur une aiguille aimantée.

H est une horloge en cuivre, à l'exception de deux ou trois pivots qui sont en acier. Elle est portée sur un trépied qui est mis d'aplomb au moyen de trois vis calantes, et est destinée à imprimer un mouvement de rotation très-rapide à un axe vertical, auquel est assujettie une pièce $b\ b'\ b''$ à trois branches, sur laquelle on place les disques que l'on soumet à l'expérience. Ces disques sont percés à leur centre d'un petit trou qui reçoit le prolongement de l'axe de rotation ; on les retient sur les branches $b\ b'\ b''$ au moyen d'une vis de pression. Des volants $v\ v'\ v''$, que l'on incline à volonté, sont destinés à ralentir plus ou moins la vitesse des disques.

Une table TT' porte un plateau pp', percé au milieu d'une ouverture un peu plus grande que les disques. Une feuille de papier est collée en ff', fig. 96, à la

face inférieure de ce plateau, et sur la face supérieure on pose une cloche *c*, dans laquelle on suspend une aiguille aimantée *a a'*, au moyen d'un fil de soie. Un petit treuil est destiné à élever ou à descendre l'aiguille. L'horloge est mise en mouvement au moyen d'un poids P. Un compteur indique le nombre de tours exécutés dans un temps donné.

Décrivons maintenant le phénomène observé par M. Arago.

Si l'on fait tourner une plaque de cuivre avec une vitesse déterminée, sous une aiguille aimantée, aussitôt que le mouvement de rotation commence, l'aiguille est chassée du méridien magnétique, avec d'autant plus de force que le mouvement est plus rapide. La force d'entraînement étant balancée par l'action de la terre, qui tend à maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, il en résulte une nouvelle position d'équilibre, qui dépend du rapport de ces deux forces; mais quand le mouvement est très-rapide, l'aiguille ne s'arrête pas et continue de tourner.

L'action que reçoit l'aiguille du disque en mouvement, décroît, pour la même vitesse, à mesure que leur distance diminue; ainsi, si l'aiguille tourne d'un mouvement continu quand les deux corps ne sont séparés que par une feuille de papier, en augmentant la distance, elle prend une position fixe, et la déviation devient toujours moindre, à mesure que l'on élève l'aiguille au-dessus du disque. Lorsque les plaques sont évidées dans la direction des rayons, l'effet est moindre que dans le cas où elles sont pleines.

M. Arago ayant soumis à l'expérience des plaques de diverses substances, de même dimension, dans l'espoir de déterminer rigoureusement le mode d'action de chacune d'elles sur l'aiguille aimantée, trouva pour les mêmes métaux des résultats si différents, suivant qu'ils contenaient plus ou moins d'alliage, qu'il préféra ne pas les publier, plutôt que de donner des valeurs qui n'étaient exactes que dans les circonstances où ce célèbre

physicien avait opéré. Les résultats généraux que nous venons d'exposer ont été annoncés par lui à l'Académie des sciences, dans la séance du 7 mars 1825. Aussitôt cette communication, on s'empressa de toutes parts de répéter l'expérience du magnétisme de rotation. Des théories furent imaginées pour expliquer ce singulier phénomène; mais M. Arago, au lieu d'en chercher la cause, s'appliqua à déterminer complétement les directions de la force qui est développée sur les disques tournants. Il chercha, à cet effet, les composantes de cette force suivant trois lignes parallèles à trois plans coordonnés perpendiculaires entre eux.

La composante perpendiculaire au plateau est une force répulsive, que l'on rend sensible au moyen d'un aimant fort long, suspendu à un fil dans une direction verticale, à l'extrémité du fléau d'une balance, qui est maintenu en équilibre avec un poids convenable placé à l'autre extrémité. Dès l'instant que le plateau commence à tourner, l'aimant est repoussé et le fléau de la balance penche de l'autre côté. La seconde composante est horizontale et perpendiculaire au plan vertical, qui contient le rayon aboutissant à la projection du pôle de l'aiguille. Cette force est celle qui imprime le mouvement de rotation à l'aiguille; elle agit tangentiellement au cercle; son effet est connu immédiatement par l'expérience.

La troisième composante est dirigée parallèlement au rayon qui aboutit à la projection du pôle de l'aiguille: on la détermine avec une aiguille d'inclinaison que l'on place verticalement, de manière que son axe de rotation soit contenu dans un plan perpendiculaire à l'un des rayons du disque. Une semblable aiguille placée au centre du disque n'éprouve aucune action. Il existe également un second point, plus voisin du bord que du centre, où elle n'éprouve non plus aucun changement dans sa position; mais entre ces deux points, le pôle inférieur est constamment attiré vers le centre, tandis qu'il est repoussé au-delà du point.

235. Les physiciens qui répétèrent les observations de

M. Arago, y ajoutèrent quelques faits nouveaux dont nous allons rendre compte. Parlons d'abord des tentatives qui ont été faites pour trouver la loi suivant laquelle agissent les plaques en raison de leur distance à l'aiguille.

MM. Prevost et Colladon ont déduit (1) d'expériences faites avec soin pour déterminer l'influence de la vitesse et de la distance des disques, que les angles de déviation et non leurs sinus augmentent proportionnellement avec la vitesse, du moins entre certaines limites; que les sinus des angles de déviation croissent en raison inverse de la puissance $2\frac{1}{5}$ de la distance.

MM. Babbage et Herschell ont annoncé que la loi suivant laquelle la force diminue quand la distance augmente, ne paraît pas être constante, et qu'elle varie entre la raison du carré et celle du cube de la distance. M. Christie a avancé, de son côté, que lorsqu'on fait tourner un disque épais au-dessous d'une aiguille très-déliée, la force qui tend à faire dévier l'aiguille croît directement comme la vitesse de rotation du disque, et inversement comme la quatrième puissance de la distance. Ces trois physiciens ont trouvé, comme on voit, des résultats différents; cela vient de ce qu'ils n'ont pas opéré dans les mêmes circonstances. Ces trois exemples montrent combien les recherches qui nous occupent sont délicates, si l'on veut arriver à des lois générales.

Parmi les physiciens qui se sont occupés des phénomènes de rotation, il faut mettre en première ligne MM. Herschell, Babbage, Barlow, Nobili, Baccelli, Christie, etc., etc. La plupart de leurs travaux présentent peu d'accord entre eux, en raison des motifs que nous avons indiqués plus haut. Nous regrettons que leur étendue ne nous permette pas d'en donner ici un exposé complet, pour que l'on puisse juger de leur mérite réciproque. Nous allons essayer cependant de présenter les princi-

(1) Bibliothèque de Genève, t. XXIX, p. 316.

paux résultats auxquels sont parvenus MM. Babbage et Herschell d'une part, et Barlow de l'autre.

Les deux premiers ont répété l'expérience de M. Arago d'une manière inverse; l'effet produit était prévu, puisque la réaction est toujours égale à l'action. Des disques de cuivre ou d'autres substances magnétiques ont été suspendus librement à un assemblage de plusieurs fils sans torsion, au-dessus d'un aimant en fer à cheval soumis à la rotation. Cet aimant, qui portait 20 livres, était disposé de manière à ce qu'il pût recevoir un mouvement rapide autour de son axe de symétrie placé verticalement, les pôles en haut. Le disque circulaire de cuivre avait 6 pouces de diamètre et 0,05 pouce d'épaisseur. Aussitôt que l'aimant fut mis en rotation, le cuivre commença à tourner dans la même direction, d'abord avec un mouvement lent, mais dont la rapidité s'accrut graduellement. En communiquant un mouvement en sens contraire à l'aimant, le disque changea également de position, et présenta les mêmes phénomènes.

L'interposition de plaques de métal de 10 pouces de diamètre et de $\frac{1}{2}$ pouce d'épaisseur entre les disques et l'aimant, ne modifièrent pas sensiblement les effets, comme M. Arago l'avait déja remarqué, et comme le prouvent encore les observations suivantes.

NOMBRE de révolutions faites.	TEMPS DE LA DURÉE DES OSCILLATIONS.				
	Zinc interposé.	Bismuth interposé.	Cuivre interposé.	Plomb interposé	Étain interposé.
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	32,0	31,5	32,0	32,0	32,0
2	44,5	44,7	46,0	46,0	45,5
3	——	54,3	56,0	56,0	55,2
4	64,0	63,0	64,7	64,7	64,0
5	72,0	70,7	72,7	72,6	71,5
6	79,0	77,5	79,5	80,0	79,0
7	86,0	84,0	86,0	86,0	85,0
8	92,0	89,8	92,0	92,0	91,2
9	97,0	95,5	97,5	98,0	96,5
10	——	101,6	103,0	103,5	102,2

Le verre interposé ne donne aucun effet, tandis que l'influence magnétique est fortement diminuée par une plaque de fer étamé, et presque annihilée avec deux de ces plaques, ainsi qu'on le voit dans la table suivante :

RÉVOLUTIONS faites.	TEMPS QU'ELLES ONT MIS.		
	Papier interposé.	1 plaque de fer étamé.	2 plaques de fer étamé.
0	... 0,0 s. ...	... 0,0 ...	... 0,0 s.
½	... — — .	... 89,7 ...	... 164,7
1 ½	... 22,5	... 128,2 ...	... — —
1	... — — .	... 159,5 ...	... — —
2	... 31,5	... 186,7 ...	... — —
2 ½	... — — .	... 211,5 ...	... — —
3	... 38,5	... 234,7 ...	... — —

Un disque de cuivre de 10 pouces de diamètre, d'un ½ pouce d'épaisseur, et tournant avec une vitesse de sept tours par seconde, ne communique aucun mouvement à un disque semblable, librement suspendu à un assemblage de fils de soie.

236. MM. Babbage et Herschell ont employé deux méthodes pour déterminer le degré de développement de la vertu magnétique dans différents métaux et dans d'autres corps. La première consiste à placer successivement chacun des disques de 10 pouces à la même distance de l'aiguille, et à les animer de la même vitesse.

NOMS des corps tournants.	MOUVEMENT du disque direct ou irrégulier.	MOUVEMENT rétrograde ou régulier.	MOYENNE.	RAPPORT de la force à celle du cuivre.
Cuivre	11° 30′	11° 17′	11° 24′	1,00
Zinc	10, 7	10, 15	10,11	0,90
Étain	5, 50	5, 12	5,21	0,47
Plomb	2, 50	2, 55	2,53	0,25
Antimoine	1, 12	1, 17	1,16	0,11
Bismuth	0, 0	0, 6	0,6	0,01
Bois	0, 0	0, 0	0,0	0,00

MM. Babbage et Herschell ont trouvé, en opérant d'une autre manière, pour l'énergie magnétique des métaux,

Zinc	1,11
Cuivre	1,00
Étain	0,51
Plomb	0,25
Antimoine	0,01

Parmi les autres métaux, l'argent paraît tenir un rang élevé dans l'échelle de l'énergie magnétique, et l'or un rang très-inférieur.

Pour déterminer l'énergie du mercure, un cercle d'une boîte de bois fut cimenté avec de la cire entre deux disques circulaires de verre, de manière à former un cylindre creux, dont le diamètre intérieur était de 2 pouces, et la hauteur de 0,1. Ce cylindre creux fut suspendu vide à un assemblage de fils de soie sans torsion, au-dessus de l'aimant en fer à cheval, dont le mouvement de rotation ne lui imprimait aucun mouvement sensible. Rempli de mercure très-pur, il n'en fut plus de même, car le cylindre obéit aussitôt, quoique faiblement, à la rotation de l'aimant dans l'une ou l'autre direction.

MM. Babbage et Herschell en ont conclu que le mercure, sous le rapport de son énergie magnétique, doit être rangé entre l'antimoine et le bismuth. Quant au bois, au verre, à la résine, au soufre et à l'acide sulfu-

rique, ils n'ont pu réussir à leur imprimer un mouvement sensible de rotation.

237. La seconde méthode qui a été employée pour déterminer l'énergie magnétique des corps est plus expéditive que la précédente, et permet d'agir sur de très-petites quantités. Cette méthode consiste à suspendre des parties de différents corps, de même forme et de même dimension, au-dessus d'un aimant en mouvement, et à noter le temps des oscillations successives et le point d'équilibre. MM. Babbage et Herschell l'ont employée à rechercher l'effet d'une solution de continuité partielle ou totale dans la masse sur laquelle on agit : expérience qui avait été faite aussi par M. Arago.

Un disque de plomb, de 2 pouces de diamètre et de $\frac{1}{10}$ d'épaisseur, fut suspendu à une distance donnée de l'aimant en fer à cheval, tournant avec la rapidité ordinaire, d'abord entier, et ensuite successivement coupé avec un burin dans le sens des rayons, comme l'indiquent les figures 97, 97*a*, 97*b*, 97*c*.

En supposant que dans les forces accélératrices il y a une accélération uniforme, on peut prendre pour les représenter l'expression $\frac{s}{t^2}$, s étant le nombre de tours, et t le temps employé ; on a dans ce cas :

COURS.	DISQUE non coupé.		DISQUE coupé comme dans la fig. 97.		DISQUE coupé comme dans la fig. 97 *a*.		DISQUE coupe comme dans la fig. 97 *b*.		DISQUE coupé comme dans la fig. 97 *c*.		DISQUE coupé comme dans la fig. 97 *e*.	
	$t=$	$f=$	$t=$	$f=$	$t=$	$f=$	$t=$	$f=$	$t=$	$f=$	$t=$	$f=$
1....	28,2.	1258	30,9.	1047	33,1.	913.	42,1	564	48,1	432	55,6	324
2....	41,2.	1178	44,5.		47,4.		59,8		69,0		61,4	302
3....	50,6.	1178	55,0.		59,0.		74,7		86,6		103,3	281
4....	58,7.	1161	63,9		68,3.		88,0		102,1		124,5	256
5....	66,4.	1134	72,0.		77,2.		100,0		116,8		145,9	235

Les autres métaux ont donné des effets semblables, mais à différents degrés : le fer doux étamé, découpé, n'a produit qu'une très-légère diminution de force, tandis que dans le cuivre l'effet de la même opération a été de réduire la force dans le rapport de 1 à 0,20.

238. Un léger disque de cuivre, suspendu à une distance donnée au-dessus d'un aimant en mouvement, exécutait six révolutions en 54",8; lorsqu'il fut coupé en huit endroits dans la direction des rayons près du centre, sa vertu magnétique fut tellement affaiblie, qu'il lui fallait 121",3 pour exécuter le même nombre de révolutions. Les parties coupées ayant été soudées avec de l'étain, l'action magnétique fut tellement rétablie qu'elle les rendit capables d'achever six révolutions en 57",3, à peu près dans le même temps que le disque entier. Ce fait est très-remarquable, attendu que l'étain n'a pas la moitié de l'énergie du cuivre. MM. Babbage et Herschell se sont servis de cette propriété pour augmenter les susceptibilités magnétiques des corps. Ils suspendirent un disque de laiton, de 2 pouces 25 de diamètre et de 0,15 pouce d'épaisseur, comme dans le dernier cas, et observèrent le temps qu'il mettait à achever ses révolutions successives :

1 tour.	2 tours.	3 tours.	4 tours.	5 tours.
20",2.	29",1.	35",2.	40",8.	45",7.

Le même disque ayant été découpé comme ci-dessus, les portions détachées furent placées sur le disque au moyen d'une légère feuille de papier, pour qu'il ne perdît rien de son poids. On eut pour le temps des oscillations :

1 tour.	2 tours.	3 tours.	4 tours.	5 tours.
41",1.	57",9.	71",0.	83",0.	93",7.

Le temps étant double, les forces étaient dans le rapport de 4:1.

Les parties coupées furent soudées avec du bismuth, dont l'énergie magnétique est très-faible. L'effet de ce

métal pour rendre le magnétisme au disque de laiton fut tel, que celui-ci décrivit ses révolutions dans le nombre de secondes qui suit :

1 tour.	2 tours.	3 tours.	4 tours.	5 tours.
28″,2.	39″,7.	48″,4.	56″,3.	63″,0.

La force accélératrice est devenue plus que double de celle qui avait été développée dans la dernière expérience.

Le bismuth ayant été enlevé, et les parties découpées remplies avec de l'étain, on trouva pour le temps des révolutions :

21″,7. 30″,8. 38″,0. 43″,5. 48″,7.

Ainsi le disque était revenu à son état primitif.

En se servant de la formule $f = 1000000 \frac{s}{t^2}$, *e* les moyennes des cinq résultats pris dans chaque cas ont donné pour les forces accélératrices :

Airain non coupé.	1,00.	Cuivre non coupé....	1,00.
——— coupé......	0,24.	——— coupé......	0,20.
Soudé avec le bismuth..	0,53.	Soudé avec l'étain.....	0,91.
Soudé avec l'étain.....	0,88.		

Tous ces résultats nous montrent l'influence des vides, et des substances qui les remplissent dans les plaques, sur leur énergie magnétique.

Les mêmes métaux réduits en fils ou en poudre ont donné des effets beaucoup moindres encore.

Tels sont les faits que MM. Babbage et Herschell ont ajoutés à ceux qui ont été découverts par M. Arago.

§ IV. *Des effets de la force coercitive dans l'acier sur le magnétisme par rotation.*

239. M. Haldat (1) a cherché la limite à laquelle une aiguille d'acier ou de fer cessait d'être entraînée par le disque rotateur; il a trouvé que toute aiguille, pourvu qu'elle fût magnétique, quoiqu'à un très-faible degré, obéissait toujours à l'action du disque, mais que cette action était sans effet sur elle aussitôt que la polarité disparaissait.

Il fit ensuite de vaines tentatives pour aimanter des aiguilles de fer ou d'acier au moyen du disque en mouvement, même lorsque la rotation était la plus grande possible.

Ayant attribué cet effet à l'absence de la vertu coercitive, il soumit à l'expérience des disques de fer et d'acier, et fut conduit à un résultat auquel il était loin de s'attendre.

Un disque de fer doux a agi avec plus d'énergie qu'un disque de cuivre; comparé à un disque de laiton, il a entraîné l'aiguille à une distance double pour la même vitesse. Le fer fortement écroui s'est comporté comme le fer doux, et n'a pu communiquer la polarité à une aiguille d'acier. Mais un disque d'acier non trempé, d'un millimètre d'épaisseur, qui devait exercer, suivant sa manière de voir, une forte action, en vertu de sa force coercitive, ne produisit aucun effet appréciable sur l'aiguille aimantée qui, après quelques oscillations irrégulières, s'est maintenue dans sa position d'équilibre ordinaire. M. Haldat en a conclu que la force d'entraînement était en raison inverse de la force coercitive.

Le même observateur a cherché comment la chaleur, qui exerce une influence sur la force coercitive de l'acier, agit sur le magnétisme par rotation. Il n'a ob-

(1) Annal. de Ch. et de Phys., t. XXXIX, p. 231.

servé aucune différence dans l'action exercée par les disques incandescents et les disques qui se trouvent à la température ordinaire.

§ V. *Des phénomènes magnétiques produits dans une sphère de fer pleine ou creuse, par la rotation.*

240. M. Barlow, le 14 avril 1825, six mois par conséquent après la première communication de M. Arago à l'Académie des sciences, a annoncé à la Société royale de Londres le résultat de ses recherches sur les effets magnétiques produits dans le fer par la rotation.

Ayant fixé un obus à un tour, auquel on pouvait communiquer un mouvement de 640 tours par minute, il plaça à peu de distance une aiguille de boussole, qui fut déviée de plusieurs degrés et resta ensuite stationnaire pendant tout le mouvement; mais elle reprit sa direction aussitôt que le mouvement eut cessé. Le mouvement ayant lieu en sens inverse, l'aiguille se dévia d'un même nombre de degrés dans un sens contraire, et tous les phénomènes précédents se reproduisirent.

L'expérience fut répétée plus en grand : une bombe de 12 pouces fut fixée au mandrin d'un tour mû par une machine à vapeur.

L'effet fut plus considérable. Dans certaines positions, l'aiguille ne recevait aucune action : il y en avait pour lesquelles la déviation avait lieu en un sens, et d'autres où elle avait lieu en sens contraire. La limite de la déviation était comprise entre zéro et 80 degrés. En raison de la situation de l'aiguille et de sa distance à l'appareil, les autres effets se reproduisirent comme précédemment.

241. M. Barlow, pour trouver les lois qui déterminent la direction de l'aiguille pour tous les cas, construisit un appareil, dans lequel il n'avait plus à craindre l'influence de la masse de fer qui faisait partie des tours. En voici la description, dont on concevra facilement le mécanisme en jetant les yeux sur la figure 98.

Cet appareil consiste en un châssis ou cadre, comme celui d'une machine électrique. Une bombe de 8 pouces de diamètre et d'un poids de trente livres remplace le cylindre. Les pieds de la table massive sont fortement assujettis sur le sol; le système moteur se compose de deux roues, l'une de 18 pouces de diamètre, et l'autre de 3.

La manivelle pouvant tourner aisément 2 tours par seconde, on imprime ainsi à la bombe un mouvement de 720 tours par minute. On place près de l'appareil un guéridon suffisamment affermi, qui a une échancrure demi-circulaire, au moyen de laquelle on peut le placer aussi près de la bombe qu'on le veut.

Une aiguille placée dessus peut en être approchée dans toutes les directions. Des trous pratiqués dans la table permettent de fixer le cadre ou châssis dans tous les azimuts. Le guéridon peut s'élever à toutes les hauteurs, afin que l'aiguille soit placée au-dessus ou au-dessous de la bombe.

Le guéridon fut d'abord élevé à la hauteur de l'axe de la bombe, et l'aiguille placée successivement en diverses positions autour d'elle.

L'aiguille, quel que fût l'azimut, pourvu que l'on détruisît l'influence terrestre au moyen d'un aimant, présenta les effets suivants : le pôle nord s'approchait de la bombe quand la partie supérieure de celle-ci descendait vers l'aiguille; dans le mouvement en sens contraire, c'était le pôle sud.

M. Barlow, tantôt mit l'axe de rotation dans le méridien magnétique, tantôt dans la direction de l'est à l'ouest, et plaça successivement la boussole autour de la bombe. Parmi les résultats qu'il a obtenus, nous rapportons ceux qui suivent :

Ayant neutralisé l'action terrestre avec un aimant convenablement placé, pour que l'aiguille fût dans une direction tangentielle à la bombe, il a trouvé que, quelle que soit la direction de l'axe de rotation, si le mouvement de la bombe est dirigé vers l'aiguille, l'extrémité

nord de cette dernière est attirée; elle est repoussée au contraire s'il a lieu dans un sens contraire. Le mouvement restant le même, si l'aiguille est successivement portée autour de la bombe, dans le demi-cercle où le mouvement est dirigé vers l'aiguille, l'extrémité nord approche de la balle, et dans l'autre demi-cercle elle s'en éloigne; les points sans action se trouvent aux deux extrémités d'un axe, et ceux où l'effet est le plus fort aux deux extrémités de l'axe qui est à angles droits. Dans ce cas, l'aiguille se dirige tout-à-fait vers le centre de la balle.

La figure 99 indique les diverses positions de l'aiguille : *s* est la bombe, *ab* son axe, *ns*, *ns*, etc., les positions primitives de l'aiguille, *n's'*, *n's'*, celles qui résultent du mouvement qui a lieu de *c* en *d*. Quand le mouvement s'effectue de *d* en *c*, les effets sont renversés.

Si l'aiguille étant parfaitement neutralisée, on la promène autour de la bombe, parallèlement à l'axe, elle a une tendance à se mettre à angles droits avec elle, et se trouve dans des directions opposées à certaines parties du cercle. Si l'on suppose, par exemple, l'axe dans le méridien magnétique, et le mouvement dirigé de l'ouest à l'est, au point est de l'horizon, l'aiguille se dirige vers l'ouest, et se comporte de même à tous les points entre l'horizon et une hauteur de 60°; au-delà, l'extrémité nord se dirige vers l'est, jusqu'à ce qu'on ait passé le zénith trente degrés à l'ouest : et alors de ce point à l'horizon ouest, l'extrémité nord se dirige vers l'ouest, et de semblables changements se passent sous la bombe.

242. De semblables effets ont lieu, quelles que soient la direction de l'axe et celle du mouvement.

Quand l'action de la terre n'est pas neutralisée et que l'on place l'aiguille successivement dans diverses positions autour de la bombe, dont l'axe est dans la direction magnétique, on a les effets représentés fig. 100. AB est l'axe de rotation; les lignes noires représentent les directions naturelles de l'aiguille, et les lignes ponctuées

celles qu'elle prend en vertu du mouvement de rotation. Commençons par le point A : si le mouvement va de gauche à droite, c'est-à-dire de *l'o* à *l'e*, l'aiguille va de *n* en *n'*, dans le même sens, jusqu'à ce qu'on arrive à 30°; elle reste alors dans sa direction naturelle; l'aiguille va au contraire de droite à gauche à 60°, 75° et à 90°, etc.

243. M. Barlow (1), pour compléter ses recherches sur la déviation produite dans la direction de l'aiguille aimantée par la rotation d'une bombe de fer, a répété les mêmes expériences sur des boulets pleins et vides, de même diamètre, afin de voir comment la masse de métal influait sur le phénomène.

Cet habile physicien se procura un boulet du poids de 68 livres, de 7,87 pouces de diamètre, ainsi qu'un projectile creux pesant la moitié de l'autre. Il attacha à un axe vertical de rotation un cylindre de bois creusé à sa partie inférieure en coupe hémisphérique. Il assujettit dans ce creux le projectile. L'appareil était disposé ensuite comme il a été dit précédemment. Voici le résultat des expériences :

Avec le boulet solide, faisant 640 tours par minute.

EXPÉRIENCES.	SITUATION de l'aiguille pendant le repos du boulet.	DÉVIATION par le mouvement vers la gauche.	DÉVIATION par le mouvement vers la droite.	DÉVIATION moyenne.
1	.. 0° 0 .	... 27° 0 ...	... 29° 0 ...	... 28° 0'
2	.. + 1 0 .	... 28 0 ...	... 29 0 ...	.. 28 30
3	.. − 0 30 .	... 28 0 ...	... 29 30 ...	... 28 45
4	.. 0 0 .	... 28 30 ...	... 29 40 ...	... 28 45
5	.. 0 0 .	... 27 30 ...	... 29 30 ...	... 28 0
6	.. + 1 0	... 27 30 ...	... 29 10 ...	... 28 15
7	.. − 0 30 .	... 27 30 ...	... 29 0 ...	... 28 15
8	.. + 1 0 .	... 28 30 ...	... 29 0 ...	... 28 45

La moyenne générale de la déviation est de 28° 24'.

(1) Edimb., Journ. of Science, n° 11.

Avec le boulet creux, faisant 640 *tours par minute.*

EXPÉRIENCES.	SITUATION de l'aiguille pendant le repos du boulet.	DÉVIATION par le mouvement vers la gauche.	DÉVIATION par le mouvement vers la droite.	DÉVIATION moyenne.
1	.. + 0° 30 .	... 14° 45 ...	... 15° 0 ...	.... 14° 52'
2	.. 0 0 .	... 15 0 ...	... 15 0 ...	.... 15 0
3	.. + 1 0 .	... 15 30 ...	... 15 0 ...	.... 15 15
4	.. 0 0 .	... 15 30 ...	... 15 30 ...	.... 15 30
5	.. − 0 30	... 15 0 ...	... 15 0 ...	.... 15 0
6	.. + 0 30 .	... 15 30 ...	... 15 30 ...	.... 15 30
7	.. + 0 30 .	... 15 0 ...	... 15 0 ...	.... 15 0
8	.. 0 0	... 15 0 ...	... 15 0 ...	.... 15 0

Moyenne générale de la déviation,

15° 5'.

Or le boulet solide a donné 28° 24' pour la moyenne des déviations, tandis que l'autre n'a fourni que 15° 5'.

La différence entre ces deux résultats est tellement marquée que, bien que M. Barlow n'ait peut-être pas employé un appareil très-parfait pour faire ses observations, on ne peut douter néanmoins que l'influence des deux sphères en mouvement ne soit très-différente. Cette différence est nulle quand les mêmes corps sont en repos, comme M. Barlow l'a démontré. Ces résultats sont entièrement conformes à ceux que MM. Arago, Babbage et Herschell avaient obtenus avec des disques de métal pleins ou évidés dans la direction des rayons.

CHAPITRE VIII.

THÉORIE MATHÉMATIQUE DU MAGNÉTISME.

244. Si l'on compare les phénomènes électriques d'attraction et de répulsion aux phénomènes magnétiques du même genre, on trouve des rapports communs et des différences caractéristiques qui ne permettent pas d'appliquer au magnétisme la théorie mathématique de l'électricité. Nous avons montré que les premiers peuvent être attribués à l'existence de deux fluides, dont les molécules de chacun d'eux se repoussent entre elles, et attirent avec la même force les molécules de l'autre fluide, et ce en raison inverse du carré de la distance. Même supposition peut être faite pour les attractions et répulsions magnétiques, c'est-à-dire que l'on peut les faire dépendre de deux fluides doués des mêmes propriétés attractives et répulsives. D'un autre côté, dans l'électricité, on partage les corps en corps conducteurs et corps non conducteurs; les premiers s'électrisent immédiatement par influence, à l'approche d'un corps électrisé, et rentrent dans l'état naturel, aussitôt que l'on retire ce corps; tandis que les autres résistent longtemps à cette action. Mais une fois que l'électricité y est développée, elle y persévère pendant plus ou moins de temps, quand ils sont hors de sa présence. Dans le magnétisme, on établit une semblable distinction entre le fer doux, non écroui, ni tordu, et l'acier trempé. Tels sont les rapports communs; voyons les différences.

Le fluide électrique pénètre toutes les substances, soit pour les traverser avec une vitesse excessive, soit pour s'y arrêter. Le fluide magnétique, tel que nous l'avons considéré jusqu'ici, n'agit d'une manière très-prononcée, pour aimanter dans l'état de repos, que sur trois métaux, le fer, dans ses différents états et combinaisons, le cobalt et le nickel. Mais il n'est jamais transporté, dans l'acte de l'aimantation, à l'une des extrémités des barreaux; puisque Coulomb a démontré que les deux fluides boréal et austral n'éprouvent que des déplacements infiniment petits, et ne sortent jamais de la molécule à laquelle ils appartenaient avant l'aimantation.

Ce mode d'action n'existe pas seulement dans le fer doux, mais encore dans l'acier, qui retient le magnétisme qu'on y a développé; cet effet est dû à l'existence d'une force coercitive qui s'oppose à la séparation et à la recomposition des deux fluides. Dans l'électricité, les attractions et répulsions des corps conducteurs ne dépendent que de leurs formes et de leurs dimensions, et nullement de leur nature; ce qui n'a pas lieu dans le magnétisme, puisque, d'une part, la forme et la dimension n'exercent aucune influence sur l'aimantation, et de l'autre, que deux masses de même forme et de même volume de fer et de nickel, dans lesquelles la force coercitive est très-faible, n'exercent pas la même action sur une aiguille aimantée placée à la même distance de chacune d'elles. Ce fait a été établi par M. Gay-Lussac qui, ayant fait osciller de chaque côté du méridien magnétique une aiguille aimantée de 0^m,2 de longueur, trouva qu'elle exécutait 10 oscillations en 131″; il plaça ensuite au-dessous, dans le même méridien, à une distance de 0^m,05, un barreau prismatique de fer doux, dont la longueur était de 0^m,196, la largeur de 0^m,018, l'épaisseur verticale de 0^m,0014, et dont le milieu se trouvait dans la même verticale que le point de suspension de l'aiguille; les oscillations devinrent plus rapides, puisqu'il y en eut d'abord dix en 65 secondes; mais bientôt après il n'en fallut plus que 60. En substituant au

barreau de fer doux un barreau de nickel pur de même forme et de mêmes dimensions, l'aiguille exécuta ses dix oscillations en 78 secondes, et peu après en 77 secondes. Le barreau de nickel ayant été enlevé, l'aiguille s'est comportée comme avant, sous l'influence terrestre. Le fer et le nickel, après cette expérience, n'ont montré aucune trace d'aimantation. Les barreaux n'ayant pas exercé sur-le-champ leur maximum d'action, il est probable qu'il leur restait encore une très-petite force coercitive. Cette expérience prouve que l'acier et le nickel ne possèdent pas le même pouvoir magnétique.

Nous arrivons à la théorie mathématique que M. Poisson a donnée des phénomènes magnétiques, indépendamment de la nature particulière des fluides boréal et austral. Dans l'impossibilité où nous sommes d'exposer ses savants calculs, nous indiquerons seulement la marche qu'il a suivie pour déterminer les résultantes des attractions et des répulsions des deux fluides, ainsi que leur distribution dans les corps aimantés.

M. Poisson admet les principes suivants pour l'aimantation : « Dans l'acte de l'aimantation, les deux fluides boréal « et austral, qui étaient réunis à l'état neutre, se sont très-« peu écartés les uns des autres. Nous ne déciderons pas « si les parties des corps aimantés, dans lesquelles la dé-« composition du fluide neutre peut s'effectuer, sont les « molécules mêmes de ces corps ; nous supposerons seule-« ment que leurs dimensions sont toujours extrêmement « petites. Nous appellerons *élément magnétique* chacune « de ces petites parties, dont la propriété caractéristi-« que consiste en ce que les quantités des deux fluides « y sont égales entre elles, dans l'état d'aimantation, « comme dans l'état neutre. Or nous pouvons concevoir, « pour envisager la question dans sa plus grande géné-« ralité, que les éléments magnétiques ne sont pas con-« tigus dans l'intérieur des corps aimantés ; qu'ils y sont « au contraire séparés les uns des autres par des espaces « pleins ou vides, où les deux fluides ne peuvent péné-« trer, et que les dimensions de ces intervalles isolants

« sont du même ordre de grandeur que celles des élé-« ments magnétiques, sans cependant que le rapport des « unes aux autres soit le même dans les aimants de na-« ture différente : cela étant, les attractions et répul-« sions, exercées par ces corps dans les mêmes circon-« stances, seront différentes, comme l'expérience l'a « déja fait connaître à l'égard du nickel et du fer. Ainsi « nous nous représenterons un corps aimanté, comme « un assemblage de parcelles magnétiques, séparées par « des espaces inaccessibles au magnétisme. Le rapport « de la somme de toutes ces parcelles au volume entier « du corps, qu'on pourrait prendre pour sa densité, « sous le rapport du magnétisme, sera une fraction « qui approchera plus ou moins de l'unité, dans les « corps de nature diverse, et qui devra être donnée pour « chaque corps en particulier; les actions extérieures « augmenteront ou diminueront d'intensité avec la gran-« deur de ce rapport. »

On voit dans le mémoire de M. Poisson suivant quelles lois dépendent ces actions; il y indique aussi la possibilité de vérifier la théorie par l'expérience, en faisant varier à volonté le rapport dont on vient de parler, en mélangeant, dans des proportions convenables, de la limaille de fer très-fine avec une autre matière non magnétique, soumettant ensuite ces corps à l'influence de très-forts aimants, et mesurant les attractions et répulsions.

M. Poisson suppose que le pouvoir attractif ou répulsif des deux fluides est le même dans tous les corps aimantés à distance égale et pour des quantités égales de fluides; il regarde cette supposition comme la plus simple que l'on puisse faire *à priori*.

La quantité qui exprime le rappor de la somme des volumes des éléments magnétiques au volume entier du corps dont ils font partie, et qui se trouve dans ses calculs, peut dépendre de la température des corps; car on conçoit que la chaleur dilate les espaces qui séparent les éléments les uns des autres et comprime

ces éléments, sans changer dans le même rapport le volume total. Dans cette hypothèse, les attractions ou répulsions magnétiques exercées par un même corps devront varier avec son degré de chaleur, ce qui est démontré, comme on l'a vu précédemment.

La plupart des expériences ayant été faites sur des barreaux aimantés, où la force coercitive était loin d'être nulle, les effets observés proviennent et de la variation de cette force, et du changement du rapport dont on parle.

Pour déterminer la variation de ce rapport, il faudrait que les mêmes expériences fussent répétées simultanément sur le fer doux et le nickel pur. Il serait utile d'étendre ce genre d'observations à d'autres métaux, dans lesquels le magnétisme ne s'est pas encore développé, et chercher s'il ne deviendrait pas magnétique à de très-basses températures. L'analogie, ajoute M. Poisson, porte à croire qu'il existe des éléments magnétiques dans tous les corps, mais que le rapport de la somme de leur volume au volume entier de chaque corps, d'où dépend l'intensité des actions magnétiques, est une fraction très-petite dans la plupart des métaux connus; ce rapport variant avec la température, il pourrait se faire qu'en abaissant convenablement celle d'un métal, ce rapport y devînt assez grand pour que ce corps fût alors susceptible d'aimantation à un degré sensible.

Le rapport entre la somme des éléments magnétiques et le volume entier du corps aimanté n'est pas la seule donnée relative à ce corps, d'où puisse dépendre l'intensité de ces actions; car la forme des éléments peut aussi influer sur cette intensité, et cette influence a cela de particulier qu'elle n'est pas la même en des sens différents. Supposons que les éléments magnétiques soient des ellipsoïdes, dont les axes aient la même direction dans toute l'étendue d'un même corps, et que ce corps soit une sphère aimantée par influence, dans laquelle la force coercitive soit nulle; les attractions ou répulsions qu'elle exercera au dehors seront différentes dans

le sens des axes de ces éléments et dans tout autre sens. C'est ainsi que lorsque l'on fait tourner cette sphère sur elle-même, son action sur un même point change en général en grandeur et en direction ; mais si les éléments magnétiques sont des sphères de diamètres égaux ou inégaux, ou bien s'ils s'écartent de la forme sphérique et qu'ils soient disposés sans aucune régularité dans l'intérieur d'un corps aimanté par influence, leurs formes n'influeront plus sur les résultats qui dépendront seulement de la somme de leur volume, comparée au volume entier de ce corps et qui seront alors les mêmes en tout sens. Ce dernier cas est celui du fer forgé et des autres corps non cristallisés dans lesquels on a observé le magnétisme. Telles sont les données fondamentales qui ont servi de bases à l'analyse mathématique de M. Poisson.

Le problème qu'il s'est proposé de résoudre est celui-ci : Déterminer en grandeur et en direction la résultante des attractions ou répulsions exercées par tous les éléments magnétiques d'un corps aimanté de forme quelconque, sur un point pris en dehors ou dans son intérieur; en ajoutant aux composantes de cette force relative à un point intérieur, celles des forces extérieures qui influent sur ce corps, on aura les forces totales qui tendent à séparer les deux fluides réunis en ce point; or, si la matière du corps n'oppose aucune résistance au déplacement de ces deux fluides, il sera nécessaire pour que l'équilibre magnétique ait lieu, que ces forces totales soient égales à zéro, sans quoi elles produiraient une nouvelle décomposition de fluide neutre, et l'état magnétique du corps serait changé. Si la force coercitive n'est pas nulle, il suffit que la résultante de toutes les forces extérieures et intérieures qui agissent en un point quelconque de ce corps, ne surpasse nulle part la grandeur donnée de la force coercitive, dont l'effet serait analogue à celui du frottement dans les machines. Il en résulte que dans ce cas l'équilibre magnétique peut subsister d'une infinité de manières différentes.

M. Poisson s'est borné à considérer l'aimantation des corps aimantés par influence pour lesquels la force coercitive est nulle.

Les deux fluides boréal et austral, dans cette supposition, se transportent sur les surfaces des éléments magnétiques, où ils sont arrêtés par la cause qui les empêche de franchir les espaces qui les séparent.

Là, ils y forment une couche très-mince, par rapport même aux dimensions de ces éléments. Cette supposition résulte de ce que l'on regarde le fluide neutre, contenu dans chaque élément, comme inépuisable. Dans ce cas, la partie décomposée doit toujours être très-petite relativement à la totalité de ce fluide.

M. Poisson a ensuite essayé de déterminer, d'après les principes et les formules qu'il a donnés, la distribution du magnétisme dans les aiguilles d'acier aimantées à saturation, et dans les aiguilles de fer doux aimantées par influence; d'où l'on déduit les lois de leurs attractions ou répulsions mutuelles.

Il a donné les équations qui renferment, pour tous les cas, les lois de la distribution du magnétisme dans l'intérieur des corps aimantés par influence, et celles des attractions ou répulsions qu'ils exercent sur des points donnés de position; mais la résolution de ses équations pour en déduire des résultats comparables à l'expérience n'est possible que dans un nombre de cas très-limité, eu égard aux différentes formes des aimants. Celui que ce célèbre géomètre a pris pour exemple admet une solution complète; c'est le cas d'une sphère pleine ou creuse, aimantée par des forces dont les centres d'action sont distribués d'une manière quelconque, au dehors ou dans son intérieur. En réduisant ces forces à une seule, à l'action magnétique de la terre, les formules deviennent très-simples; on en déduit sans difficulté la déviation d'une aiguille de boussole, produite par le voisinage d'une sphère aimantée par l'influence de la terre. Cette déviation varie avec les distances du milieu de l'aiguille au centre de la sphère,

au plan du méridien magnétique passant par ce centre, et au plan mené par le même point perpendiculairement à la direction du magnétisme terrestre. Les lois de ces diverses variations données par le calcul s'accordent avec celles que M. Barlow a trouvées par l'expérience.

Ce calcul montre aussi que l'action d'une sphère creuse est à très-peu près indépendante de son épaisseur, tant que le rapport de celle-ci au rayon n'est pas une très-petite fraction qui peut changer de valeur avec la matière et la température de la sphère.

M. Barlow, comme nous l'avons vu, a cherché les déviations qu'une aiguille aimantée éprouve de la part d'une sphère pleine ou creuse de fer, aimantée par l'action du globe terrestre. En soumettant successivement la même aiguille à l'action de deux sphères de fer de même nature, de dix pouces anglais de diamètre, l'une entièrement pleine, et l'autre creuse, celle-ci pesant un quart de moins que la première, il a reconnu ce fait fondamental, que, dans la même position, la déviation de l'aiguille aimantée est égale pour les deux sphères, qu'elles soient pleines ou creuses, pourvu néanmoins que l'épaisseur des sphères creuses surpasse une certaine limite qu'il a fixée à un trentième de pouce. Dans ce cas, la déviation de l'aiguille produite par la sphère creuse, soumise en premier lieu à l'expérience, est réduite aux deux tiers environ de la déviation correspondante à une sphère pleine de même dimension. M. Barlow en a conclu, comme les expériences de Coulomb sur des aimants formés d'un certain nombre de barreaux pouvaient le faire présumer, ainsi que celles de M. Nobili qui sont plus récentes, que le magnétisme résidait à la surface des corps aimantés, ou du moins qu'il ne pénétrait pas dans leur intérieur au-delà de la limite que nous venons de citer.

M. Poisson, en cherchant à obtenir, au moyen de ses formules, les résultats que M. Barlow a déduits de ses observations, a cru devoir ne pas négliger dans le calcul des déviations de l'aiguille, les corrections dues à sa

longueur et à sa réaction sur la sphère aimantée, quand l'aiguille est le plus rapprochée de la sphère, c'est-à-dire quand elle se trouve à une distance de son milieu au centre de ce corps égale à 12 pouces.

M. Barlow a reconnu, qu'en plaçant dans le même point le milieu d'une aiguille de 6 pouces, et celui d'une petite aiguille d'un demi-pouce en longueur, les déviations étaient les mêmes. M. Poisson a pensé que les deux corrections dont on vient de parler, dont l'une tendait à augmenter la déviation, et l'autre à la diminuer, se sont compensées l'une l'autre. Notre célèbre mathématicien avoue cependant que cette compensation a été imparfaite, car en calculant les déviations de l'aiguille, et négligeant la double correction, la différence qu'il a trouvée entre le calcul et l'expérience était trop grande pour être attribuée en entier aux erreurs des observations. Nous allons en citer ici quelques exemples. M. Barlow a trouvé, avec une sphère de 6p,4 et en plaçant le milieu de l'aiguille à 12 pouces de distance de la sphère, que la déviation de l'aiguille aimantée était de 36° 15', l'aiguille étant placée soit à l'est, soit à l'ouest du méridien magnétique; tandis que M. Poisson n'a trouvé par le calcul que 32° 38' : la différence de 3° 37', qui ne peut être attribuée en entier aux erreurs de l'observation, est due en grande partie, suivant lui, à la longueur et à la réaction de l'aiguille dont on n'a pas tenu compte dans le calcul. M. Poisson n'avait pas par devers lui les données nécessaires déduites de l'expérience pour effectuer la correction relative à la réaction de l'aiguille.

Dans un autre cas où la distance du milieu de l'aiguille au centre de la sphère était de 15 p. et au-delà, les déviations calculées, en faisant également abstraction de la longueur et de la force de l'aiguille, ont toujours été plus petites que les déviations observées comme dans le cas précédent; ces différences, qui ont été souvent de 1° et quelques minutes dans le même sens, ne se trouvent que dans la comparaison des grandeurs absolues des déviations, puisque les lois de variation

auxquelles sont soumises les déviations, suivant la position des aiguilles, s'accordent, soit qu'on les déduise de la théorie ou de l'expérience; sous ce rapport, les nombreuses observations de M. Barlow viennent confirmer les recherches analytiques de M. Poisson.

Cet accord remarquable du calcul et de l'observation est une confirmation importante de l'exactitude de l'analyse et de la théorie sur laquelle elle est fondée. M. Poisson, pour soumettre son analyse à de nouvelles épreuves, a cherché s'il ne serait pas possible de résoudre les équations générales, en les appliquant à des corps qui n'eussent pas, comme la sphère, une forme constante; il a trouvé qu'elles peuvent être résolues très-simplement, dans le cas d'un ellipsoïde quelconque, pourvu que la force qui produit son aimantation fût constante en grandeur et en direction dans toute son étendue; ce qui a lieu, par exemple, à l'égard du magnétisme terrestre. Nous y reviendrons quand nous traiterons cette dernière question.

Après avoir donné les formules relatives à un ellipsoïde dont les trois axes ont entre eux des rapports quelconques, M. Poisson considère les deux cas extrêmes où ce corps est très-aplati, et où il est, au contraire, très-alongé. Dans le premier, le corps aplati peut représenter une plaque dont « l'épaisseur varierait *très-lentement près du centre et décroîtrait depuis ce point jusqu'à la circonférence : son action sur des points peu éloignés de son centre doit être sensiblement la même que celle de toute autre plaque d'une épaisseur constante et d'une très-grande étendue. De même un ellipsoïde très-alongé peut être représenté, dans la pratique, par une aiguille ou une barre dont le diamètre décroît depuis son milieu jusqu'à ses extrémités, en variant d'abord très-lentement, et son action sur des points voisins de son milieu doit très-peu différer de celle d'une barre dont le diamètre est très-petit par rapport à la longueur.* »

« Lors donc, ajoute M. Poisson, que les physiciens au-

ront observé les actions d'une barre ou d'une plaque, aimantée par l'influence de la terre, sur des points très-rapprochés du milieu ou du centre de ces corps, on pourra comparer, sous ce nouveau point de vue, la théorie à l'observation. Afin de faciliter cette comparaison, j'ai eu soin d'énoncer dans mon mémoire les conséquences principales du calcul qui mériteraient le plus d'être vérifiées par l'expérience. »

CHAPITRE IX.

THÉORIE MATHÉMATIQUE DES PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES DE ROTATION.

245. Plusieurs théories ont été imaginées pour expliquer les phénomènes magnétiques de rotation; nous ne nous y arrêterons pas, parce qu'elles ont été renversées par les belles découvertes de M. Faraday sur l'induction magnétique, dont nous parlerons dans le livre suivant. Nous donnerons seulement un exposé de la théorie magnétique que M. Poisson a donnée de ces phénomènes, attendu que les résultats analytiques coïncidaient tellement avec ceux de l'observation, à l'époque où elle parut, le 10 juillet 1826, que les physiciens doivent la prendre en considération, quelles que soient les idées qu'ils aient adoptées sur la cause première de ces phénomènes.

M. Poisson, pour expliquer la différence d'action du magnétisme des corps, dans l'état de repos et dans l'état de mouvement, remonte aux premiers principes qui ont servi de base à sa théorie du magnétisme. On a vu dans le chapitre précédent qu'il attribue tous les phénomènes magnétiques à deux fluides impondérables, soumis aux lois générales de l'équilibre et du mouvement, et qui peuvent exercer sur les corps, en vertu de l'action réciproque de leurs particules, des pressions qui peuvent être mesurées. La loi de leur attraction et de leurs répulsions est celle de la raison inverse du carré de la distance. La différence essentielle qui existe entre ces

deux fluides, et ceux auxquels sont dus les phénomènes électriques, consiste en ce que les derniers peuvent passer d'une molécule à une autre, et parcourir toute l'étendue d'un corps, tandis que, dans l'acte de l'aimantation, les particules des deux fluides magnétiques n'éprouvent que des déplacements si faibles qu'ils n'ont pas encore pu être appréciés. M. Poisson appelle *éléments magnétique* les petites portions des corps dans lesquelles les fluides boréal et austral peuvent se mouvoir, et qui sont séparées les unes des autres par des intervalles imperméables au magnétisme.

La proportion de la somme de leur valeur au volume entier de chaque corps, qui n'est pas la même dans les différents corps, suffit pour montrer comment, dans l'état de repos, ces matières donnent des signes de magnétisme plus ou moins marqués sous l'influence des mêmes forces extérieures.

Nous avons vu ce que c'était que la force coercitive dans les aimants, et dont les effets peuvent être comparés à ceux du frottement dans les machines. M. Poisson admet que les substances où cette force est nulle ou insensible, et où l'aimantation se produit dès que la moindre force extérieure commence à agir, que ces substances, dis-je, exercent une action analogue à la résistance des milieux sur les particules des deux fluides, laquelle action retarde le mouvement des fluides dans l'intérieur des éléments magnétiques, et qui peut être très-différent dans les différentes matières. Il attribue à cette espèce de résistance particulière à chaque substance, les phénomènes magnétiques des corps en mouvement.

Supposons donc, avance M. Poisson, « qu'on ap-
« proche un aimant d'une matière où la force coercitive
« est insensible, et où les éléments magnétiques sont
« en proportion quelconque, aussitôt la décomposition
« du fluide neutre commencera dans les éléments, et
« elle continuera jusqu'à ce que l'action du fluide libre
« fasse équilibre à la force extérieure, ce qui ne man-

« quera pas d'arriver si cette force est constante en « grandeur et en direction. Mais si elle varie continuel- « lement, ou bien, si l'aimant extérieur change de po- « sition par rapport aux éléments du corps soumis à « son influence, les deux fluides, au lieu de parvenir « à un état permanent, se mouvront dans chaque élé- « ment avec des vitesses dépendantes, toutes choses égales « d'ailleurs, de la résistance que la matière du corps « leur oppose. Dans cet état, nous ne saurions détermi- « ner à chaque instant la distribution variable des deux « fluides dans les aimants magnétiques : néanmoins, on « peut concevoir qu'elles soient très-différentes de la dis- « tribution permanente qui a lieu dans l'état d'équilibre : « il est possible en effet que, pendant le mouvement, « la décomposition du fluide neutre ayant lieu dans « toute l'étendue de chaque élément, l'un des deux flui- « des, boréal ou austral, soit en excès dans chacun de « ces points, et qu'au contraire, dans l'état d'équilibre, « le fluide décomposé soit transporté à sa surface, où « il forme une couche d'une très-petite épaisseur par « rapport aux dimensions de cet élément. L'action exer- « cée au dehors par un même élément soumis à l'in- « fluence des mêmes forces, serait alors très-différente « dans les deux cas, puisque, dans l'un, elle émanerait « seulement des points voisins de sa surface, et dans « l'autre, de tous les points de son volume.

« Toutefois, je ne fais ici cette observation que pour « indiquer une cause probable de la différence d'action « magnétique que l'expérience a fait connaître entre les « corps en mouvement et les corps en repos. Mon ana- « lyse embrasse à la fois ces deux cas, et je l'ai affran- « chie de toute hypothèse relative à la disposition des « deux fluides dans les éléments magnétiques ; elle est « fondée sur un seul principe dont les conséquences dé- « duites par un calcul rigoureux devront être comparées « à l'expérience ; en voici l'exposé le plus général : si « un élément magnétique, de forme quelconque, est « soumis à l'action d'une force donnée, qui soit la même

« pour tous ses points, l'action qu'il exercera sur un « point extérieur de position déterminée aura pour ex- « pression la somme des trois composantes de cette force, « multipliées par des fonctions du temps, qui seront « nulles dans le premier moment et qui acquerront « des valeurs constantes, après un très-court inter- « valle de temps; ce temps très-court dépendra de la « vitesse des deux fluides ou de la résistance que la « matière de l'élément oppose à leur mouvement. On « fait abstraction, comme on l'a déja dit, de la force « coercitive, dont l'effet se fera sentir pendant un temps « bien plus long et qui empêcherait même toute décom- « position de fluide neutre de commencer, tant que la « force extérieure n'aurait pas une grandeur convenable. » En partant de ce principe, et conformément à l'expérience, M. Poisson montre qu'une matière dans laquelle les éléments magnétiques sont très-rares, et qui n'exerce qu'une très-faible action sous l'influence de forces constantes, peut néanmoins en exercer une très-puissante sous l'influence de forces très-variables; et, réciproquement, il peut se faire que l'action exercée par un autre corps dans le premier cas soit très-peu augmentée dans le second. On conçoit très-bien que les constantes relatives à ces deux genres d'action doivent être déterminées par l'expérience. En les supposant connues, le problème que M. Poisson s'est proposé de résoudre est celui-ci:

« Déterminer l'action magnétique exercée à chaque « instant par un corps, de forme quelconque, en repos « ou en mouvement, sur un système de points donnés « de position, ce corps étant soumis à des forces dont « les composantes sont aussi données en fonction du « temps. »

Les équations générales qui renferment la solution de la question se résolvent facilement dans le cas d'une sphère homogène tournant sur elle-même avec une vitesse constante; M. Poisson a trouvé que, lorsque la force à laquelle elle est soumise est égale pour tous les points, comme l'action de la terre, son état magnétique

est le même que si elle était en repos, et que si l'on ajoutait à la force donnée une autre force semblable dont la direction soit perpendiculaire à l'axe de rotation et même à très peu près normale au plan passant par cette droite et parallèle à la force extérieure; résultat qui rentre dans la proposition générale que l'on doit à M. Barlow.

M. Poisson a fait aussi une application de ses formules à l'action d'une plaque tournante au-dessus d'une aiguille aimantée, ou d'une plaque immobile sur une aiguille en mouvement; les formules ne sont seulement applicables qu'au cas où les bords de la plaque sont assez éloignés des pôles de l'aiguille pour que leur influence mutuelle soit insensible; car ce célèbre géomètre a trouvé que l'action des bords, à cause de leurs arêtes, présente des difficultés d'analyse très-grandes. Il a donné dans son mémoire les trois composantes de l'action exercée sur un point donné, par une plaque circulaire, tournant uniformément sur elle-même, et dont on considère le diamètre comme infini; l'une de ces forces est parallèle à la surface de la plaque et agit circulairement; l'autre lui est aussi parallèle, mais elle est dirigée suivant les rayons qui partent de son centre de rotation; la troisième est normale à cette surface. Nous ne donnerons pas ici l'expression mathématique de ses composantes, parce que nous serions obligés d'entrer dans des considérations qui nous jetteraient en dehors du plan que nous nous sommes proposé; nous nous bornerons à dire que, si la plaque est horizontale, la première composante est la force qui écarte l'aiguille du méridien magnétique; les deux autres composantes agissent sur le pôle inférieur de l'aiguille d'inclinaison. Si celle-ci est un peu longue, leur action est insensible sur l'autre pôle, et quand le plan dans lequel elle tourne passe par le centre de rotation de la plaque, ces deux forces sont les seules qui la font dévier de sa direction naturelle. Quant à l'action verticale de la plaque tournante sur les deux pôles de l'aiguille horizontale, elle dimi-

nue son poids apparent d'une quantité dont M. Poisson a donné l'expression analytique.

La composante horizontale a constamment le même signe, quand on regarde le diamètre de la plaque comme infini; mais il n'en est plus de même dans la réalité, quand la projection horizontale du point sur lequel cette force s'exerce, s'approche de la plaque. Notre savant géomètre a trouvé, dans ce cas, en raison de l'influence des bords, que l'expression de cette force se compose de deux termes de signes contraires qui sont égaux, à une certaine distance du centre de rotation, de manière qu'en-deçà et au-delà cette force est dirigée dans deux sens opposés.

Quand la plaque horizontale est mobile, son action diminue les amplitudes successives de l'aiguille de déclinaison et de celle d'inclinaison, en influant beaucoup moins sur la durée de leurs oscillations, ce qui s'accorde avec les expériences de M. Arago. Dans ce cas, les diminutions dans l'amplitude de ces aiguilles sont des quantités du même ordre qui peuvent se déduire l'une de l'autre, ce qui n'a pas lieu dans le cas du mouvement. Lorsque l'on connaît la déviation horizontale correspondante à une vitesse donnée de la plaque, on peut en conclure, au moyen d'une formule, la diminution d'amplitude des oscillations de la même aiguille à la même distance de cette plaque.

M. Poisson considère que les forces qui agissent sur la plaque, quand elle est immobile ou en mouvement, sont le magnétisme terrestre et l'action des pôles de l'aiguille sur lesquels elle réagit. Dans le cas où la plaque est très-étendue, l'influence de la première cause est peu considérable, ce qui fait que la réaction de la plaque est sensiblement proportionnelle au carré de l'intensité magnétique des pôles de l'aiguille. La même chose n'a pas lieu à l'égard de la déviation d'une aiguille produite par l'action d'une sphère ou d'un autre corps en repos, ou en mouvement, aimanté par l'action de la

terre; cette déviation est toujours la même, quel que soit le degré d'aimantation de l'aiguille. M. Poisson a montré que les résultats de son analyse coïncidaient avec ceux qui ont été déduits de l'observation dans leur ensemble général, à l'époque où il publia son travail. On ne peut rien exiger de plus d'une théorie mathématique.

DE

L'ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

LIVRE III.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ACTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES CONTINUS OU DISCONTINUS SUR L'AIGUILLE AIMANTÉE, L'ACIER ET LE FER DOUX.

§ Ier. *De l'action des courants électriques sur l'aiguille aimantée.*

246. On savait depuis long-temps qu'une décharge électrique jouissait de la propriété de donner le magnétisme à une aiguille d'acier, et même de renverser les pôles d'un aimant, ou de lui faire acquérir des points conséquents; semblables observations avaient été faites sur les aiguilles de boussole des vaisseaux qui avaient été frappés de la foudre. Franklin, Beccaria et d'autres physiciens avaient essayé, mais en vain, de remonter à la source de ce phénomène; on fut donc obligé d'admettre que la décharge électrique qui ébranle les particules de la matière, produit le même effet que le choc d'un marteau. Cette explication, faute d'autres, fut admise jusqu'en 1820, où M. OErsted, professeur à Copenhague, qui avait conçu depuis long-temps un système à l'aide

duquel il cherchait à expliquer les affinités et le magnétisme, eut l'heureuse idée d'essayer l'action d'un courant électrique sur une aiguille aimantée, librement suspendue. Cette tentative eut un plein succès et nous valut une découverte du premier ordre, dont les applications n'ont pas tardé à faire connaître toute l'importance. A M. OErsted appartient la gloire d'avoir posé le premier la base fondamentale de cette partie nouvelle de la science que nous appelons *l'électro-magnétisme.*

Voici le fait fondamental découvert par M. OErsted. Supposons un fil de métal qui joigne les deux pôles d'une pile, si on en approche une aiguille aimantée, suspendue sur un pivot, on voit qu'elle tourne, s'agite et reçoit une action de la part du fil conducteur.

M. OErsted ne s'en tint pas à cette première indication; il étudia toutes les circonstances du phénomène avec une grande sagacité, et fut conduit par-là à connaître dans le fil, traversé par le courant électrique, une action révolutive. Pour en étudier toutes les circonstances, l'aiguille fut d'abord placée au-dessus du fil tendu horizontalement dans le plan du méridien magnétique. Le pôle nord fut chassé dans un sens, et le pôle sud dans l'autre. Quand l'aiguille était très-rapprochée du fil, et que l'action de la pile était vive, l'aiguille se mettait à angle droit avec le fil; en plaçant l'aiguille au-dessous, la déviation était inverse; en la mettant à droite ou à gauche, elle s'inclinait dans un sens ou dans un autre. M. OErsted admit sur-le-champ que l'aiguille ne pouvait éprouver une semblable action que de la part d'une force qui agissait d'une manière révolutive autour du fil, comme l'indique la fig. 101, et à laquelle on a donné le nom de force *électro-dynamique.*

Les beaux travaux que M. Ampère a faits à ce sujet constituent l'électro-dynamique, c'est-à-dire la science qui comprend tous les phénomènes relatifs à l'action des courants les uns sur les autres, quelles que soient leur direction et leur origine. Les propriétés générales des courants étant bien établies, le reste n'est plus qu'une

question de dynamique sur laquelle nous nous étendrons peu. Avant d'exposer ces propriétés, nous devons nous entendre sur le sens du courant. On est convenu de prendre pour sa direction celle qu'il affecte quand il va du pôle positif au pôle négatif. Lorsque le courant passe par un conducteur rectiligne, on l'appelle courant rectiligne; s'il traverse un cylindre creux, courant cylindrique; un fil courbe, courant curviligne, etc.... Si le conducteur forme un circuit complet, on dit que le courant est fermé. Ces définitions sont relatives seulement à la direction du courant et non à son mode d'action sur les conducteurs.

M. Ampère, pour mieux préciser encore la direction du courant, suppose qu'un homme est couché dans le sens de la longueur d'un fil conducteur, les pieds du côté du pôle positif, la tête du côté du pôle négatif, de telle sorte que le courant va des pieds à la tête. Il admet ensuite que la face est tournée vers le milieu de l'aiguille; l'effet est tel alors que l'aiguille a toujours son pôle austral vers la gauche de l'homme.

§ II. *De l'action à distance du courant sur l'aiguille aimantée.*

247. Avant d'exposer l'action des courants les uns sur les autres, nous devons chercher comment le courant agit sur l'aiguille aimantée en raison de la distance, afin de nous faire une idée bien précise de son mode d'action. La découverte de la loi qui régit cette action à distance est due à MM. Biot et Savart.

Pour l'observer, ils prirent une aiguille aimantée AB fig. (102), suspendue à un fil de cocon au moyen d'une chape de cuivre, et placée sous une cloche de verre pour éviter les agitations de l'air. Pour se débarrasser entièrement de l'action du magnétisme terrestre, ils neutralisèrent cette action au moyen d'un barreau A'B' placé dans l'axe de l'aiguille, les pôles inverses en regard, et à une distance convenable, pour que les oscillations

fussent extrêmement lentes. Au moyen de cette disposition, l'aiguille était préparée à obéir sans difficulté à l'action du courant. Ils employèrent un gros fil de cuivre Cz, de 8 ou 10 pieds de long, tendu verticalement et traversé par le courant: l'appareil était tellement disposé que l'on pouvait varier la distance du fil à l'aiguille, qui correspondait toujours sensiblement au milieu de sa longueur. De plus, la distance de l'aiguille au fil pouvait varier au moyen d'un appareil à engrenage. D'après la loi découverte par OErsted, l'aiguille se mit immédiatement en croix avec le courant. En la dérangeant de sa position d'équilibre, elle y revenait par une suite d'oscillations isochrones, dont la durée dépendait de l'intensité de la force du courant.

Le tableau suivant renferme les résultats d'un certain nombre d'expériences:

Distance du courant au centre de l'aiguille.	Durée de dix oscillations.
mm 30	40,25
40	48,85
30	42,00
20	33,50
30	41,00
50	54,75
30	42,25
60	56,75
30	41,75
120	89,00
30	42,50
15	30,00
30	43,15

La pile variant à chaque instant, on est revenu souvent à la même distance pour opérer de nouveau; puis l'on a pris des moyennes, afin de pouvoir compter sur les résultats. Pour remonter des oscillations aux forces qui les ont produites, il faut se rappeler que les intensités de ces forces sont comme les carrés des nombres

d'oscillations exécutées dans le même temps; d'après cela, si l'on représente par i et i' les intensités de la force dans deux expériences, N et N' le nombre des oscillations, on aura $\frac{i}{i'}=\frac{N^2}{N'^2}$.

Maintenant, pour déterminer la loi de l'intensité quand la distance varie, il est facile de voir, au moyen des résultats précédents, qu'elle est en raison inverse de la distance; en effet, admettons cette loi, on aura, en désignant les distances au fil par D et D',

$$\frac{i}{i'}=\frac{D'}{D},$$

d'où on déduira $\frac{N^2}{N'^2}=\frac{D'}{D}$ ou $N'=N\sqrt{\frac{D}{D'}}$;

et comme dans le pendule on a $\frac{N'}{N}=\frac{T}{T'}$,

on en déduira $\frac{T}{T'}=\sqrt{\frac{D}{D'}}$,

T et T' représentant les durées de 10 oscillations. Or, faisant D=30 millim., et prenant pour T le résultat de l'expréience, 42, 25, et pour D' diverses distances 42, 25, on a pour les valeurs de T', des nombres qui diffèrent très-peu de ceux qui sont donnés par l'expérience.

DISTANCES du courant au centre de l'aiguille.	DURÉE DE 10 OSCILLATIONS.		EXCÈS du calcul.
	calculée.	observée.	
10 ...	... 48,62 ...	... 48,85 ...	.. — 0,23
20 ...	... 33,88 ...	... 33,50 ...	.. + 0,38
50 ...	... 53,74 ...	... 54,75 ...	.. — 1,00
60 ...	... 59,40 ...	... 56,75 ...	.. + 2,65
120 ...	... 84,25 ...	... 89 ...	.. — 4,75
15 ..	... 30,99 ...	... 30 ...	.. + 0,99

Les différences qu'il y a entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience sont assez faibles pour que nous puissions en conclure que la force électro-dynamique croît en raison inverse de la simple distance.

Nous avons supposé que le courant était rectiligne et indéfini relativement à la longueur de l'aiguille; on a donc, par conséquent, le résultat exercé par tout le fil sur l'aiguille; cependant il est possible de déterminer, par le calcul, la force électro-dynamique exercée par l'élément de ce fil. M. Laplace a trouvé qu'en supposant la force élémentaire agissant en raison inverse du carré de la distance, comme l'attraction générale et les forces électriques, l'action d'un long fil était en raison inverse de la simple distance, conformément aux expériences de MM. Biot et Savart.

238. Il restait à déterminer si l'action de chaque tranche de fil était encore la même dans toutes les directions à distance égale, ou si elle éprouvait des changements dans différents sens. Pour résoudre cette question, MM. Biot et Savart ont tendu, dans un plan vertical, un long fil ZMC (fig. 103), plié en M de manière que les deux lignes ZM et MC fissent deux angles égaux avec l'horizontale HM. Ils ont tendu ensuite un autre fil semblable au premier, dans une direction verticale, lequel n'était séparé du premier, en M, que par une feuille de papier très-mince. L'aiguille aimantée ayant été ensuite suspendue devant ce double fil, ils firent passer successivement le courant dans le fil vertical et le fil oblique; puis ils firent osciller l'aiguille. Des résultats obtenus, M. Biot en déduisit par le calcul, que l'action de chaque élément oblique sur chaque molécule M du magnétisme austral ou boréal de l'aiguille, était proportionnelle au sinus de l'angle formé par l'élément du courant et la ligne, qui joint le milieu de cet élément avec le pôle magnétique et inversement au carré de la distance. M. Savary, en appliquant aux expériences de MM. Biot et Savart les formules données par M. Ampère, pour des courants électriques, et en partant de la loi précédente,

a trouvé que l'action totale du fil était réciproquement proportionnelle à la simple distance, et directement à la tangente du quart de l'angle ZMC.

L'intensité du courant électrique est la même en un point quelconque d'un fil de métal qui joint les deux extrémités d'une pile. Il est facile de démontrer ce fait qu'on pouvait prévoir *à priori* avec le multiplicateur à deux fils : soient P et N les deux extrémités d'une pile, et PN le fil conjonctif. Prenons sur ce fil, à partir de son milieu *o*, des distances égales *oa*, *ab*, *be*, *oa'*, *a'b'*, *be'*, soudons-en chacun des points *a*, *b*, *c*, etc., *a'*, *b'*, *c'*, etc., des fils de cuivre égaux en longueur et en diamètre, et mettons deux fils contigus, *aa*, *bb*, en communication avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur; l'aiguille aimantée sera déviée de sa position d'équilibre, et d'autant plus que la distance *a b* est plus petite. Si l'on met, en même temps, en communication avec le même multiplicateur, les deux fils *c'j'*, *d s'*, de manière à produire, dans le fil conjonctif, un courant dirigé en sens inverse du premier, l'aiguille n'éprouvera aucune action. Les deux courants sont donc égaux; de là nous concluons que, puisque pour des distances égales *ab*, *bc*, *cd*, etc., les courants secondaires sont égaux, le courant doit avoir la même intensité à tous les points du fil conjonctif.

§ III. *Des hélices.*

239. Puisqu'une aiguille aimantée, suivant qu'elle est placée au-dessus ou au-dessous du fil conjonctif, se dirige perpendiculairement à la direction de ce fil, avec cette différence néanmoins que, dans chaque cas, le même pôle n'est pas dirigé du même côté, il en sera encore de même lorsque le fil sera replié sur lui-même de manière à former un circuit fermé; l'action se trouvera alors doublée. L'inspection seule de la fig. 104 suffit pour se rendre compte de cet effet. Il résulte de là que si l'on plie le fil sur lui-même de manière que le courant ne puisse pas passer d'une spire dans l'autre, condition qui est

remplie en employant un fil recouvert de soie, on forme des spirales dont l'action sur l'aiguille aimantée augmente en raison du nombre des spires. C'est ce principe qui a servi de base à la construction des multiplicateurs, dont nous nous sommes occupés au commencement de ce volume.

On obtient le même résultat avec des hélices que l'on forme en enroulant convenablement un fil de métal sur un tube de verre; l'hélice est dextrorsum, fig. 105, ou sinistrorsum, fig. 106, selon que le fil va vers la droite ou vers la gauche. Dans la première, le pôle boréal de l'aiguille est toujours du côté par où entre le courant; dans la seconde, c'est le pôle austral qui se trouve à l'extrémité positive. Les hélices, telles que les a imaginées M. Ampère, ont le même diamètre, et les spires qui les composent ont des inclinaisons égales. Nous nous occuperons plus loin de l'action de ces hélices les unes sur les autres et sur les aimants.

§ IV. *Action produite sur l'aiguille aimantée du multiplicateur par les décharges d'une bouteille de Leyde.*

250. M. Colladon est le premier qui ait obtenu une action sur l'aiguille aimantée du multiplicateur, avec un courant électrique produit par la machine électrique ou la décharge d'une bouteille de Leyde. Sans entrer en explication, pour l'instant, sur toutes les causes qui s'opposaient à la réussite de l'expérience, je rapporterai d'abord les observations de M. Colladon. Ce physicien avait eu l'occasion de remarquer que l'isolement des différents tours du multiplicateur était une des conditions indispensables pour le succès de l'expérience; aussi, pour remplir aussi complétement que possible cette condition, construisit-il son appareil, comme il a été dit (12). A chacune des extrémités du fil était soudée une pointe très-fine destinée à soutirer l'électricité. L'une des pointes ayant été mise en communication avec les coussins d'une machine électrique, l'autre fut placée de-

vant un des conducteurs, à différentes distances, pour soutirer l'électricité positive; M. Colladon obtint les résultats suivants :

A 1 déc. de distance, une déviation de 90° à 72°, ou de.............................. 18°
2 déc.......................... 10
4 .... 5 ½
8 3
1 mètre......................... 2

La déviation était donc encore sensible quand la pointe se trouvait à 1 mètre du conducteur.

Il paraît que l'action soutirante d'une pointe est sensiblement proportionnelle à sa distance du conducteur, mais qu'à une certaine proximité cette action n'augmente plus. Avec la machine à cylindre qui n'a qu'un seul coussin, la loi de proportionnalité s'est maintenue pour de plus petites distances. M. Colladon a expliqué cette différence, en disant que, dans les machines à plateau qui ont quatre coussins, les surfaces de ces derniers, ne communiquant entre elles que par des conducteurs très-imparfaits, il arrive un instant où l'extrémité du galvanomètre, qui est en communication avec l'une de ces surfaces, ne soutire que la quantité d'électricité qui est égale à celle que peut fournir au plateau un seul coussin; alors l'action ne doit plus augmenter.

Avec la machine à cylindre, non-seulement la déviation marche régulièrement, comme nous venons de le dire, mais encore elle est proportionnelle à la vitesse avec laquelle on tourne la manivelle, comme on peut s'en assurer en réglant le mouvement avec un compteur.

M. Colladon, dans une expérience où la manivelle faisait trois tours par seconde, a obtenu

Repos.	Déviation constante.	Déviation absolue.
90°	125°	35°

en alternant les extrémités du multiplicateur,

90°	54°	36°.

Une batterie de 4000 pouces a donné des écartements trop près du maximum pour qu'on pût les mesurer; mais en n'approchant que très-lentement la pointe, la déviation a été sensiblement la même pendant quelques instants. Dans une des expériences, la déviation a été de 30° pendant 65 secondes.

Avec une bouteille de Leyde de 2 pieds carrés, chargée aussi fortement que possible, la déviation de l'aiguille a été de 32°.

Voilà une différence d'action bien marquée entre l'électricité voltaïque et celle qui est dégagée par les machines ordinaires : ces deux électricités sont cependant identiques dans leur nature, mais elles ne le sont pas à la vérité dans leur état.

251. M. Faraday (1), qui s'est beaucoup occupé de cette question, a reconnu qu'il était nécessaire, pour qu'un courant d'électricité ordinaire qui traverse un multiplicateur fît dévier l'aiguille aimantée, que l'action eût le temps de se développer; condition qui était remplie en transmettant le courant à travers l'eau, un fil, l'air raréfié ou au moyen de pointes dans l'air ordinaire; alors on obtient les mêmes effets qu'avec un courant voltaïque. Il a reconnu, en outre, que l'eau salée et les acides étaient plus convenables pour produire des effets que tout autre mode, comme les pointes et les balles, attendu que les premiers convertissent la charge d'une puissante batterie en un courant continu, qui agit comme tel sur l'aiguille aimantée, et qui ne dérange pas sensiblement le magnétisme des aiguilles. Voici le dispositif des expériences que fit M. Faraday pour arriver à ces conséquences : il prit une batterie électrique composée de quinze jarres, présentant chacune une surface armée, sur les deux faces, de 84 pouces carrés. Cette batterie était chargée avec une forte machine électrique.

Les deux surfaces de la batterie furent mises en communication avec des tuyaux qui servaient à transporter

(1) Phil. Transact., 1re partie, p. 30.

le gaz dans les divers quartiers de Londres, afin de faire parcourir à l'électricité de grandes distances.

M. Faraday s'attacha d'abord à déterminer le pouvoir retardateur des mauvais conducteurs, en employant un multiplicateur à deux aiguilles, composé de deux parties indépendantes et formé chacun de dix-huit pieds de fil de cuivre recouvert de soie; les deux moitiés étaient semblables en figure et en nombre de tours; elles étaient placées l'une à côté de l'autre, et séparées par un petit intervalle où se trouvait l'aiguille. Lorsque les courants introduits dans les deux moitiés avaient la même direction, ils agissaient sur l'aiguille avec la somme de leurs puissances; dans le cas contraire, ils agissaient avec leur différence. La jarre de verre qui recouvrait l'appareil et qui portait l'aiguille, était revêtue en dedans et en dehors jusqu'à une certaine hauteur, pour que l'on pût observer les mouvements de l'aiguille. La partie supérieure, non revêtue, fut entourée d'un fil de métal garni de nombreuses pointes aiguës. Quand le fil et les deux surfaces armées communiquaient ensemble au moyen des longs conducteurs des tuyaux à gaz, on pouvait alors approcher une pointe isolée ou une balle à une distance d'un pouce du multiplicateur, sans que l'aiguille fût affectée par l'attraction ou la répulsion ordinaire. Il n'y avait donc pas d'électricité libre pendant la décharge de la batterie. L'extrémité B du fil ou du multiplicateur fut mise ensuite en communication avec la surface extérieure de la batterie et le long conducteur. L'extrémité A fut jointe à la surface intérieure au moyen d'une baguette de décharge, par l'intermédiaire d'un cordon mouillé de quatre pieds de long. La batterie ayant été chargée positivement, on la déchargea avec la baguette, de manière que le courant traversa le multiplicateur; l'aiguille fut aussitôt déviée.

Pendant que l'aiguille oscillait on chargeait rapidement la batterie, et lorsque l'oscillation recommençait, on faisait passer de nouveau la décharge au travers; en répétant cette action plusieurs fois, les oscillations dé-

passèrent 40°. L'effet produit ne variait ni dans sa direction ni dans son degré, lorsqu'on se servait d'un cordon court et épais, ou même de quatre cordons épais, au lieu du fil long et mince. Avec un multiplicateur très-sensible, l'aiguille éprouvait une secousse après chaque décharge.

Les déviations eurent lieu dans le même sens que si un courant électrique eût passé à travers le galvanomètre, c'est-à-dire, de même que si la surface de la batterie électrique chargée positivement eût été remplacée par le pôle positif de l'appareil voltaïque (268), et la surface négative par le pôle négatif.

La batterie ayant été mise de côté, l'on établit ensuite les communications de manière à ce que le courant de la machine passât du premier conducteur dans la baguette de décharge, puis à travers le cordon humide, le fil du multiplicateur, et enfin dans le conducteur qui le dispersait. On pouvait arrêter ce courant quelques moments en enlevant la baguette de décharge et en arrêtant la machine. L'aiguille fut disposée de telle sorte que lorsque ses oscillations avaient peu d'étendue, il lui fallait 25 battements d'une montre pour effectuer une oscillation.

Le courant venant de la machine traversa le fil du multiplicateur pendant 25 battements, ensuite il fut interrompu pendant 25 autres battements, renouvelé pendant 25 battements, et ainsi de suite. L'aiguille commença bientôt à osciller, et l'amplitude de l'oscillation alla jusqu'à 40°.

En substituant au cordon mouillé un fil de cuivre, les effets furent tout-à-fait les mêmes. Au lieu de faire passer l'électricité à travers le système avec la baguette de décharge, qui était mise en contact avec le conducteur, on fixa quatre pointes sur la baguette ; quand on faisait passer le courant, elles étaient suspendues à environ 12 pouces loin du conducteur; dans ce cas, l'aiguille était fortement déviée, et les résultats s'accordaient parfaitement avec les premiers.

Ces expériences prouvent bien, comme nous l'avons avancé précédemment, que l'on peut obtenir une déviation continue de l'aiguille aimantée dans le multiplicateur, avec la machine électrique ordinaire, pourvu que l'on donne le temps à l'action de se produire, résultats que l'on obtient en faisant traverser à l'électricité des conducteurs imparfaits.



CHAPITRE II.

DE L'AIMANTATION DU FER ET DE L'ACIER PAR LES COURANTS ÉLECTRIQUES CONTINUS ET DISCONTINUS.

§ Ier. *Premières observations relatives à l'aimantation par les courants et les décharges électriques.*

252. Aussitôt après la découverte de l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée, M. Arago a trouvé que ce même courant développait fortement la vertu magnétique dans des lames de fer doux ou d'acier qui ne la possédaient pas avant. Voici les résultats qu'il a obtenus : 1° de la limaille de fer doux placée à peu de distance d'un fil de métal, qui joint les deux extrémités d'une pile, est attirée par lui et retombe aussitôt que celle-ci cesse de fonctionner ; 2° le fil conjonctif, plongé dans la limaille, s'en charge tout autour en formant des anneaux concentriques, dont l'épaisseur, qui est quelquefois de plusieurs millimètres, dépend de la force de la pile ; 3° si l'on substitue au fer doux de petites aiguilles d'acier, on leur donne une aimantation permanente, et elles se mettent en croix avec le fil conjonctif, en tournant chaque pôle d'un côté ou de l'autre, suivant le sens du courant. Il résulte de ces observations et de celles qui sont rapportées dans le paragraphe précédent, que pour donner du magnétisme à des aiguilles qui en sont privées, il faut les placer dans la direction perpendiculaire au fil conjonctif, ou bien, si on veut leur procurer un fort degré d'aimantation, les introduire dans une

hélice, et faire passer le courant à travers le fil. Il suffit d'un seul instant pour aimanter une aiguille aussi complétement que possible.

M. Arago a imaginé d'aimanter un fil d'acier placé dans l'axe de deux hélices symétriques, de même diamètre, séparées par une partie rectiligne du même fil, et dirigées en sens contraire; le courant électrique, en parcourant les spires de ces diverses hélices, aimanta les portions correspondantes du fil d'acier comme si elles avaient été séparées les unes des autres : il en est résulté un point conséquent à la jonction de chacune des hélices. En opérant avec trois hélices, dirigées alternativement en sens contraires, il a obtenu deux points conséquents. Voilà un moyen de faire naître des points conséquents dans un fil d'acier, autant qu'on le veut, en multipliant convenablement l'inversion des spires.

M. Arago a reconnu, en outre, que dans l'intérieur d'une hélice qui est suffisamment longue par rapport à son diamètre et dont le pas est très-court, des aiguilles placées d'une manière quelconque, mais parallèlement à l'axe, acquièrent toutes à peu près la même intensité magnétique. A l'extérieur l'aimantation est très-faible, et d'autant moindre que l'hélice est plus longue et les spires plus rapprochées.

253. M. Nobili ayant construit une spirale plane avec un fil de cuivre, plaça, entre les spires isolées les unes des autres, perpendiculairement à leur plan, des aiguilles d'acier, et fit passer une décharge électrique quelconque à travers la spirale. Les aiguilles situées vers le centre, et celles qui étaient voisines de la circonférence, s'aimantèrent en sens contraire; il en résulte qu'à une certaine distance du centre, l'aimantation devait être nulle. Nous expliquerons plus loin ce mode d'action.

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une machine électrique dans un fil droit, en mettant en communication les deux extrémités avec les conducteurs et les coussins, on n'obtient aucun effet dans une aiguille placée très-près de ce fil, tant que le courant est continu; mais

pour peu que l'on tire de petites étincelles, l'aiguille commence à s'aimanter, et le magnétisme augmente à mesure que les étincelles sont plus fortes et partent de plus loin. En employant des hélices les effets sont encore plus marqués; dans ce cas, le courant continu, comme l'a observé M. Ridolfi, peut donner du magnétisme à une aiguille. Les décharges des bouteilles de Leyde ou des batteries agissent puissamment pour développer du magnétisme, quand elles agissent dans des fils droits ou dans des hélices; mais leur action est dépendante de la distance des spires aux aiguilles, non-seulement pour l'intensité du magnétisme, mais encore pour la nature de l'effet produit. Nous touchons ici à une partie intéressante de la physique, que M. Savary a traitée avec talent.

§ II. *De l'aimantation par les décharges électriques.*

244. Le travail que M. Savary a fait sur ce sujet est aussi complet qu'on peut le désirer, mais les résultats qu'il a obtenus sont si nombreux, que je ne puis rapporter que les plus importants.

Il a commencé par opérer sur des aiguilles d'acier très-fines, placées horizontalement à diverses hauteurs, et perpendiculairement à un fil métallique en ligne droite et également horizontal; leur milieu correspondait verticalement à la direction du fil. Il a d'abord pris un fil de platine d'un quart de millimètre de grosseur, et de 2 mètres de longueur; les aiguilles, dont la trempe était forte, avaient un quart de millimètre de diamètre, et 15 millimètres de longueur. Après avoir fait passer dans le fil de platine la décharge d'une batterie électrique de 22 pieds de surface, il les fit osciller pour déterminer la quantité de magnétisme qu'elles avaient prise. Il obtint les résultats suivants. On a indiqué dans le tableau le sens de l'aimantation, parce que ce sens change avec la distance de l'aiguille au fil.

AIGUILLES en contact avec le fil pendant la décharge.	DISTANCE du fil.	DURÉE de 60 oscillations.	SENS de l'aimantation.
		"	
1re		52,4	Positive.
2e	1, m 2 du fil.	1' 3,8	*idem.*
3e	2,5	1.12,8	Négative.
4e	3,7	44,6	*idem.*
5e	5,0	40,0	*idem.*
6e	6 m,0	41,8	*idem.*
7e	7,4	44,8	*idem.*
8e	8,5	58,2	*idem.*
9e	9,7	1.20,1	*idem.*
10e	10,9	1.52,0	Positive.
11e	11,8	1.18,6	*idem.*
12e	12,5	1. 1,0	*idem.*
13e	13,8	49,6	*idem.*
14e	16,3	38,2	*idem.*
15e	18,7	33,8	*idem.*
16e	21.0	31,3	*idem.*
17e	23,8	29,5	*idem.*
18e	28,5	30,8	*idem.*
19e	34,0	29,8	*idem.*
20e	46,0	35,9	*idem.*
21e	70,0	55,6	*idem.*
22e	100,0	1.27,6	*idem.*
23e	130,0	1.48,0	*idem.*

Ces résultats nous montrent une propriété très-remarquable des décharges électriques, celle de produire une aimantation en sens inverse, suivant la distance de l'aiguille au fil; dans les expériences précédentes, le sens du magnétisme a changé deux fois. Les aiguilles n'ont pas pris de points conséquents, le maximum d'intensité pour les aiguilles négatives s'est trouvé à 5 millimètres du fil, et les maxima des aiguilles positives au contact et à 3 centimètres de hauteur.

245. Quand on fait varier les longueurs des aiguilles, on trouve que les distances auxquelles a lieu le changement de sens dans l'aimantation ne diffère que de quelques dixièmes de millimètre. Dans les expériences précédentes, le fil de platine avait 2 mètres de longueur; si on lui en donne plus que la moitié, les résultats sont différents de ceux que nous avons donnés. Nous rapportons ici les résultats qui ont été obtenus dans ce cas par M. Savary.

AIGUILLES de 15 millimètres de longueur.	DISTANCE au fil pendant la décharge.	DURÉE de 60 oscillations.	SENS de l'aimantation.
		′ ″	
1re	0 m 0	1. 3,1	Positive.
2e	1,1	2.29,0	Négative.
Dans une autre série à	1,4	1.48,3	*idem*
3e	2,0	sans aimantation ap-	préciable.
4e	3,0	1.25,6	Positive.
5e	4,3	1. 5,6	*idem.*
6e	5,5	1. 3,0	*idem.*
7e	6,7	1.13,6	*idem.*
8e	8,0	1.32,2	Positive.
9e	8,6	3. 8,0	Très-peu négative.
10e	9,6	1.34,8	Négative.
11e	10,5	1.17,2	*idem.*
12e	12,3	1. 1,2	*idem.*
13e	13,5	56,4	*idem.*
14e	14,6	50,0	*idem.*
15e	15,7	59,4	*idem.*
16e	16,9	1. 3,0	*idem.*
17e	18,2	1. 5,0	*idem.*
18e	19,1	1.16,8	*idem.*
19e	20,0	2.29,0	*idem.*
20e			
21e	21,4	Presque nul	Un peu négative.
22e	23,3	1.23,7	Positive.
Etc., etc.			

On voit qu'avec un fil moitié moindre de l'autre, il y a eu quatre changements dans le sens de l'aimantation, et que les aiguilles qui étaient négatives dans la première série sont positives dans la seconde, et réciproquement. Le dernier maximum, qui se trouvait à 3 cent. de hauteur, est à 4 cent. $\frac{1}{2}$; sa valeur n'est plus que de 34″.

256. M. Savary a cherché également ce qui se passait lorsque la longueur du fil restait la même, c'est-à-dire égale à un mètre, le diamètre n'étant plus le même. Avec un fil de 0, mil. 37 de diamètre, le changement de signe a eu lieu aux distances 3, 5, 9 et 12. En prenant un fil plus fin que le précédent, d'un diamètre égal à un huitième de millimètre, il n'y a plus eu de changement dans le sens de l'aimantation, et le maximum d'intensité s'est trouvé à 11 millimètres de hauteur; c'est-à-dire à une

distance cinq fois moindre du fil, que lorsqu'on opérait avec un fil de platine trois fois plus gros; ce maximum est l'état de saturation que l'on obtient avec des aimants, lequel est six fois plus considérable que celui qu'on obtient avec un fil d'un diamètre triple.

Si l'on fait passer dans le même fil des décharges de plus en plus faibles, le maximum diminue à mesure que l'on approche du conducteur, sans cependant obtenir des changements de signe.

Une décharge donnée produit toujours une aimantation dont l'intensité est d'autant plus grande, que la longueur du fil est plus grande par rapport à son diamètre. Cet accroissement dans les effets a une limite que M. Savary a déterminée; dans trois séries d'expériences qu'il a faites avec des fils d'un huitième de millimètre de diamètre et de 0, mil. 50 de longueur, de 1 mètre 0, et de 4 mètres 30, il a reconnu que le fil d'un mètre donnait le maximum absolu le plus élevé, et que les maxima relatifs à chaque série se trouvaient d'autant plus près du fil, qu'il était plus long.

Il en résulte que, pour une même batterie, des fils de même longueur et des aiguilles pareilles, les résultats dépendent de l'intensité de la décharge, du diamètre et de la longueur du fil.

257. Nous ne mentionnons pas ici plusieurs résultats auxquels M. Savary est parvenu, parce que nous nous sommes bornés à ne rapporter que les plus importants, afin que l'on puisse prendre une idée juste de l'aimantation des aiguilles d'acier au moyen des décharges électriques.

Le même physicien a trouvé qu'avec une tige en laiton de 5 millimètres de diamètre, il y avait encore renversement dans l'aimantation. Il a cherché ensuite si tous les points du fil conducteur exerçaient des actions égales dans des longueurs peu étendues. Il a trouvé qu'il en était ainsi, attendu que des aiguilles fort éloignées les unes des autres, placées à des mêmes hauteurs, pourvu

qu'elles ne fussent pas trop près des extrémités de la partie rectiligne, communiquaient la même quantité de magnétisme.

258. Pour étudier l'influence mutuelle des différentes parties d'un circuit, M. Savary a disposé trois séries d'aiguilles sur trois fils de laiton placés à la suite les uns des autres et joints ensemble par leur extrémité; ces fils avaient la même longueur : le premier, qui était situé entre les deux autres, avait un diamètre de 0, millim. 125, le second de 0, millim. 375, le troisième de 0, millim. 75. Sur ces fils, l'aiguille maximum faisait 60 oscillations en 36″, et il a conclu des faits observés que l'égalité d'action qui a lieu sur tous les points d'un fil conducteur, subsiste encore dans un circuit composé de fils n'ayant pas le même diamètre.

259. M. Savary a cherché comment variaient les résultats, suivant que les aiguilles étaient trempées roides ou non trempées ; les aiguilles avaient 15 millim. de long, et 0, mètre 30 de diamètre, et provenaient toutes du même acier.

1re SÉRIE.

AIGUILLES TREMPÉES ROIDES.

AIGUILLE.	DISTANCE au fil pendant la décharge.	DURÉE de 60 oscillations.	SENS de l'aimantation.
		′ ″	
1	0,6	1.22,8	positive.
2	1,6	1.13,4	*id.*
3	2,5	1.20,0	*id.*
4	3,9	2 14,5	*id.*
5	4,9	1.42,0	négative.
6	6,3	1.13,6	*id.*
7	7,6	1. 5,8	*id.*
8	9,8	1. 5,6	*id.*
9	10,8	1. 0,8	*id.*
10	12,4	1.35,4	*id.*
11	14,8	2.14,4	positive.
12	15,0	0.42,2	*id.*

IIe SÉRIE.

AIGUILLES NON TREMPÉES FLEXIBLES.

NUMÉRO des aiguilles.	DISTANCE au fil pendant la décharge.	DURÉE de 60 oscillations.	SENS de l'aimantation.
		′ ″	
1	0,0	1 58,5	positive.
2	1,2	3 50,0	*idem.*
3	2,4	1.49,5	*idem.*
4	3,8	1.18,0	*idem.*
5	5,3	1.01,2	*idem.*
6	6,3	0 56,4	*idem.*
7	7,3	0.51,6	*idem.*
8	9,4	0.50,2	*idem.*
9	10,3	0.48,4	*idem.*
10	12,8	0.46,8	*idem.*
11	15,4	0.47.2	*idem.*
12	42,0	1.10,6	*idem.*

Les aiguilles trempées roides présentent deux changements de signe, et celles non trempées aucun; le maximum dans les aiguilles trempées roides est bien plus loin du fil conducteur que dans les autres.

Il paraît que l'aimantation, dans l'état de trempe, est un état tel d'équilibre entre des forces et des résistances plus grandes, qu'une cause extérieure l'altère plus difficilement.

L'influence du diamètre des aiguilles sur l'aimantation ne peut donc être dégagée de la trempe pour faire varier les résultats; ce qui est facile à concevoir, puisque les parties intérieures d'une aiguille épaisse ne peuvent prendre, dans le refroidissement subit, la même disposition que les couches extérieures.

Relativement à l'intensité que prennent des aiguilles de trois grosseurs différentes, et de même longueur, il a reconnu que les aiguilles moyennes ne donnaient qu'un minimum en contact avec le fil même, tandis que dans les grosses aiguilles il y avait un décroissement continu d'intensité, à mesure qu'on les éloignait du fil. Il en a déduit

une explication du renversement des pôles dans les aiguilles de boussole par des coups de foudre; le mode de renversement doit varier effectivement selon que l'action de l'électricité sur ces aiguilles est différente, selon qu'elle s'exerce, d'un côté ou de l'autre, à une distance plus ou moins grande.

260. Occupons-nous actuellement de l'aimantation dans les hélices, par les décharges électriques.

L'hélice dont M. Savary a fait usage était un cylindre creux de bois de 9 cent. de long, et d'environ 6 millim. $\frac{1}{2}$ de diamètre, autour duquel était enroulé un fil de laiton de 0, millim. 180 de grosseur; le bas de l'hélice pouvait avoir 3 millim. de hauteur. En donnant au fil une longueur de 0, mètre 80, des aiguilles de 15 mill. de long., d'un $\frac{1}{4}$ de mill. de diamètre, et trempées roides, ont été aimantées par des décharges de plus en plus fortes. Il a obtenu les résultats suivants, pour la durée de 60 oscillations, en suivant l'ordre d'intensité croissante des décharges: +25",6; + 56",8; —38",2; —25",5; + 28",9; +27",1; —42",0; —33",1; —57",6; + 27",8; +23",0; + 34",6; —1",15; +31",3. Cette série indique que le sens de l'aimantation a changé six fois. M. Savary pense que si l'on diminuait encore la longueur du fil, on obtiendrait peut-être un plus grand nombre d'inversions.

Si l'on augmente la longueur du fil, sans changer la partie roulée en hélice, il faut employer une force plus grande, pour obtenir les premiers changements de signe, mais ensuite il n'y a plus de renversement et on ne trouve plus que des variations d'intensité magnétique. Il a examiné ensuite le cas où, le diamètre et la longueur du fil étant les mêmes, on change successivement la longueur, le diamètre et le pas de l'hélice. La longueur des hélices, aussitôt qu'elle est égale à sept ou huit fois leur diamètre et deux fois plus grande que la longueur des aiguilles, n'exerce plus, ou presque plus, d'influence sur l'intensité magnétique.

M. Arago avait démontré que des aiguilles placées d'une manière quelconque dans l'intérieur d'une grande

hélice, à une certaine distance des extrémités, prenaient toutes le même degré d'aimantation, et que ce degré était à peu près le même dans deux hélices de différents diamètres et d'une certaine longueur, pourvu que leurs pas fussent égaux et suffisamment courts. Quand les spires sont à 3 millim. de distance, l'action des hélices est en raison inverse du diamètre; mais comme cet accroissement est très-faible, M. Arago, pour le mesurer, a placé l'une dans l'autre les deux hélices qui tournent dans le même sens, en les faisant communiquer par les extrémités des fils qui les recouvrent. On a alors deux courants en sens inverse. L'aimantation est nulle, ou plus ou moins sensible, suivant que les deux hélices ont des facultés égales ou différentes d'aimantation.

Si les deux hélices, au lieu de tourner dans le même sens, tournent en sens contraire, on a des actions qui s'ajoutent; c'est un moyen d'avoir des effets doubles, triples, etc. Voici quelques résultats qui montrent que pour des intensités de charges électriques déterminées par approximation, l'action d'une décharge est très-différente du double de l'action d'une décharge simple:

INTENSITÉ des charges électriques.	DURÉE DE 60 OSCILLATIONS.	
	HÉLICE SIMPLE.	HÉLICE DOUBLE.
2	+ 35″,5	+ 22″,9
3	+ 22,9	+ 30,4
4	+ 27,2	+ 1′,2,0
4 ½	+ 31,8	— 1,17,0
5	— 32,8	— 23,5

Ces résultats montrent que l'action d'une décharge double est très-différente du double de l'action d'une décharge simple.

261. Dans les expériences précédentes, toutes les décharges, les plus faibles comme les plus fortes, étaient tirées de la même batterie, et l'on supposait qu'à des décharges égales correspondaient les mêmes tensions; mais si l'on donne aux surfaces électrisées des étendues très-différentes et de plus en plus petites, à mesure que pour des charges égales la tension est plus élevée, on trouve que les maxima d'intensité magnétique pour la même hélice ont moins de valeur.

M. Arago ayant trouvé que dans l'intérieur d'une hélice, des aiguilles semblables sont également aimantées, M. Savary a soumis à l'expérience les différentes parties d'une même aiguille, pour déterminer les effets dus à la différence de longueur. Il prit à cet effet des aiguilles de même trempe et de même diamètre, mais de trois longueurs, 1 millim., 10 millim. et 5 millim.; à chaque décharge, trois nouvelles aiguilles de différentes longueurs furent placées dans l'hélice; après l'aimantation, on les fit osciller, puis les aiguilles moyennes furent brisées en deux, celles de 15 millimètres en trois parties égales, et l'on fit osciller ces fragments qui étaient égaux aux plus petites aiguilles.

Le même physicien a observé que les fragments égaux d'une même aiguille étaient toujours aimantés également, et dans le même sens que celui de l'aiguille entière.

Dans le tableau suivant, les nombres indiquent la durée moyenne des durées presque égales qu'on obtient en faisant osciller successivement les fragments d'une même aiguille.

CHARGES électriques.	DURÉE DE 60 OSCILLATIONS.				
	Aiguilles de 15 millim.	Aiguilles de 10 millim.	Aiguilles de 5 millim.	Fragments de 5 millim. des aiguilles moyennes.	Fragments de 5 millim. des grandes aiguilles.
	"	"	"	"	"
1	+ 29.4	+ 22,4	+ 16,7	+ 14,0	+ 11,5
2	− 40,0	− 30,6	− 22.3	− 16,6	− 16,0
4	− 1′25,4	− 1′ 6,8	Nulle	− 28,2	− 24,5
6	+ 30,3	+ 21.6	+ 14,2	+ 12,5	+ 11,7
»	+ 28,5	+ 20,0	+ 14,1	+ 12,5	+ 41,4
»	− 28,7	− 21,1	− 14,7		
»	− 26,9	− 19,8	− 14,8		
»	+ 33,6	+ 24,0	+ 16,6		

La première conséquence que l'on tire de ces expériences, c'est que les aiguilles de longueurs différentes sont toujours aimantées dans le même sens; la seconde, que les aiguilles de 5 millimètres ont pris moins d'intensité magnétique que les fragments égaux des aiguilles de 10 millimètres, et ceux-ci moins encore que les fragments des aiguilles plus longues.

Plusieurs questions restent à résoudre; le décroissement a-t-il une valeur déterminée? comment l'influence de la tension se combine-t-elle avec l'influence de la longueur des fils, de leur diamètre, et de l'écartement des spires? comment les phénomènes sont-ils modifiés par la température des fils?

262. M. Arago avait trouvé que la force qui aimante le fer et l'acier transmet son action à travers le bois, le verre et les autres corps isolants, et que, dans ce cas, l'aimantation était la même; M. Savary a recherché l'influence des corps conducteurs sur l'aimantation produite par les courants électriques. Il a placé en conséquence dans une hélice deux aiguilles, l'une sans enveloppe, l'autre entourée d'un cylindre épais de cuivre rouge isolé du conducteur. Il a trouvé d'abord que la décharge qui aimantait fortement la première, ne produisait aucun effet sur la

seconde ; ainsi le cuivre anéantissait la force d'aimantation. En substituant à l'aiguille non aimantée dans l'étui une aiguille déja aimantée, mais de manière à renverser ses pôles, ou du moins à affaiblir son magnétisme, le cuivre s'est opposé encore à l'action de l'électricité.

Mais en diminuant peu à peu l'épaisseur de l'enveloppe, l'intensité des décharges étant toujours la même, les aiguilles enveloppées commencèrent à éprouver une action de plus en plus sensible. L'aiguille, après avoir atteint un maximum, se rapprocha de nouveau, par des diminutions successives, du degré d'aimantation de l'autre aiguille. Ainsi donc, pour des épaisseurs de plus en plus faibles, l'aiguille enveloppée atteignait la plus forte intensité magnétique des deux. Il trouva aussi qu'en augmentant l'intensité des décharges, l'épaisseur d'enveloppe, pour laquelle les deux aiguilles recevaient le même degré d'aimantation, devenait de plus en plus grande. L'accroissement de magnétisme dû à de moindres épaisseurs d'enveloppe devenait aussi de plus en plus grand. M. Savary a fait ces observations avec des lames d'étain dont on pouvait diminuer l'épaisseur à volonté; quand il a comparé deux tubes de métal d'épaisseur et de longueurs égales, mais de rayons différents, il a trouvé que le plus large exercait l'action la plus forte, et que si deux tubes avaient le même diamètre, la même épaisseur et des longueurs inégales, le plus court était celui dont l'action avait le plus d'influence. Il a comparé l'action des cylindres formés de métaux différents; trois aiguilles de 15 millim. de longueur, et de o, mètre 4 de diamètre, furent placées, l'une dans un cylindre de cuivre de 5 millim. de rayon; la seconde, dans un cylindre pareil, en étain; et la troisième sans enveloppe; elles reçurent dans une même hélice les quantités de magnétisme, ayant pour mesure les nombres $+ 2' 35''$; $+ 45''$; $- 1' 52''$, qui étaient les durées de 60 oscillations pour chaque aiguille. On voit par-là que l'aiguille qui n'avait pas d'enveloppe a pris une aimantation différente des deux autres.

En comparant deux cylindres d'étain de trois millim. d'épaisseur, l'un de 65 millim., et l'autre de 100 de longueur, leurs actions pour une faible décharge ont été dans le rapport de 3 à 1 ; ce fait montre qu'il doit exister entre la longueur et l'épaisseur d'un cylindre métallique une certaine relation, afin que son influence soit la plus grande possible pour une décharge donnée.

En changeant la nature de la substance isolante qui sépare l'hélice de l'enveloppe métallique, et donnant à cette enveloppe, dans l'intérieur de l'hélice, une position quelconque, pourvu que les axes de figure restent parallèles, on ne modifie pas pour cela l'action de l'aiguille. Si l'on multiplie concentriquement autour de l'aiguille les alternatives de couches conductrices et non conductrices, l'action des premières n'est pas sensiblement changée, par suite de leur isolement. Des enveloppes très-épaisses de limailles fines, égales en poids à des cylindres de ces métaux qui détruisent l'action des décharges, sont sans effet pour s'opposer à cette action.

Si dans un tube de verre rempli de mercure on place parallèlement à l'axe, à diverses distances de la surface, depuis la circonférence jusqu'au centre, diverses aiguilles, et qu'on les compare à une aiguille soumise à la même décharge, dans la même hélice, on trouve d'abord un accroissement graduel d'intensité, un maximum, puis une diminution qui va jusqu'au centre. Quand la charge est faible, ou que l'enveloppe est assez épaisse, on trouve qu'il y a un certain rayon pour lequel la somme des actions du métal est nulle.

Voici les résultats que M. Savary a obtenus en plaçant des aiguilles de 2 cent. de longueur, et de 0, mètre 5 de diamètre, à diverses distances de la surface métallique dans un tube de verre de 10 millim. de rayon intérieur rempli de mercure.

Distance à la surface extérieure du liquide,

1, mil. 5; 2, mil. 0; 2, m. 8; 4 m. 0; 6 m. 0; 10 m. 0.

Durée de 40 oscillations.

28", 9; 28", 8; 29", 1; 30", 8; 49", 2; 1', 22", 7.

Il est à remarquer qu'une aiguille semblable aux précédentes, aimantée sans l'intermédiaire du mercure, faisait le même nombre d'oscillations en 1',49",3.

Les métaux qui ont été essayés en cylindres très-épais, sont, le fer, le cuivre, l'étain et le mercure; ils exercent des actions qui vont en décroissant; quant aux conducteurs liquides, tels que les acides nitrique et sulfurique, quoique leur action ne soit pas nulle, elle n'a pas été déterminée.

263. M. Savary a étudié le mode d'action des plaques métalliques qui sont sous l'influence des décharges transmises par un fil conducteur rectiligne, sur des aiguilles d'acier disposées transversalement à ce fil; les aiguilles ayant été mises en contact avec les surfaces métalliques, et ayant opéré avec des décharges inférieures à celles qui par leur action directe produisaient dans l'acier, suivant la distance du fil, une aimantation différente, il a obtenu les résultats suivants :

1° « Une large plaque interposée entre le conducteur « et les aiguilles pour des décharges très-faibles, affaiblit « beaucoup l'aimantation, et l'augmente par des décharges « plus fortes; ainsi pour une même charge, une plaque « mince et une plaque épaisse peuvent produire des « effets contraires, et il y a une certaine épaisseur dont « l'effet est nul. »

« 2° Des aiguilles posées sur la plaque, entre cette « plaque et le fil : pour de très-faibles décharges, elle « augmente leur aimantation, et d'autant plus qu'elle « est plus épaisse. Il y a telle décharge pour laquelle une « plaque épaisse l'augmente, et une plaque mince la di- « minue; pour des décharges plus fortes, l'une et l'autre « l'affaiblissent, la dernière surtout, et elle finit par don- « ner aux aiguilles un magnétisme contraire à celui que « le courant seul développait.

« En général, les deux faces d'une même plaque exer- « cent des actions contraires. »

Les plaques de différents métaux, de même forme et d'égales épaisseurs, exercent des actions qui varient

avec l'intensité des décharges. Ainsi le cuivre rouge en plaques minces agit moins que le laiton; avec des plaques beaucoup plus minces, il agit au contraire davantage.

Nous rapportons ici quelques-uns des résultats auxquels il est parvenu; les signes + et — indiquent toujours le sens de l'aimantation. Trois aiguilles furent placées à 2 millim. au-dessous du fil conducteur : la 1re aimantée sur une lame de verre, durée de 60 oscillations, + 1',25"; sur une lame de laiton, — 1',28"; sur une lame de cuivre pareille, — 1',56"; pour une décharge plus forte et deux lames plus minces, cuivre — 1',4", laiton — 1',34".

L'argent agit à peu près comme le cuivre, tandis que l'or a un mode d'action plus fort.

M. Savary pense avec raison que l'action des enveloppes métalliques peut servir à étudier ce qui se passe dans les différentes parties des aiguilles d'acier elles-mêmes pendant l'aimantation; car on peut admettre que les couches extérieures des aiguilles agissent sur les couches intérieures à la manière des autres enveloppes métalliques. Nous partageons d'autant plus son opinion à cet égard, que les résultats obtenus par Coulomb et par M. Nobili, sur la distribution du magnétisme dans l'intérieur des aimants, viennent à l'appui des observations de M. Savary sur l'aimantation produite à différentes distances de la surface dans un tube de verre rempli de mercure.

§ III. *De l'aimantation par les courants électriques.*

264. M. Savary a appliqué à la pile les modes d'expérimentation que nous venons d'exposer.

Le fil conjonctif, comme on l'a vu, est parcouru dans toutes ses parties par un courant électrique dont l'intensité est partout la même; il n'est pas étonnant par conséquent qu'il aimante également sur toute sa longueur une aiguille d'acier: quand l'action de la pile n'est pas très-énergique, il aimante peu; dans ce cas il faut enrouler le conducteur en hélice.

Ce mode d'aimantation est sensiblement instantané, du moins pour des aiguilles d'une petite longueur, et n'augmente pas d'intensité.

L'aimantation par la pile présente les mêmes phénomènes que ceux qui sont produits par le passage d'une décharge électrique.

Lorsque la tension de la pile augmente et que la conductibilité diminue, la partie de l'effet analogue aux effets des décharges est plus grande et l'action du courant continu a moins d'influence.

C'est ainsi qu'une pile de 20 couples, chargée avec un liquide très-peu conducteur, a donné aux aiguilles un sens d'aimantation contraire à celui que l'on a obtenu avec une pile plus fortement chargée. Dans le premier cas, des aiguilles qui étaient plus longues que des hélices étaient aimantées dans le même sens et plus fortement que celles qui étaient placées au centre de ces mêmes hélices. Quand la pile était plus énergique, le contraire avait lieu.

M. Savary a trouvé que l'action des métaux autres que le fer et l'acier, devient plus sensible sous l'influence des petites tensions. L'exemple suivant en est une preuve. Si l'on place deux aiguilles dans une même hélice, l'une sans enveloppe, l'autre avec une enveloppe de cuivre épaisse, d'environ 5 mill. de rayon, un courant énergique les aimante à peu près de même, et d'autant plus fortement que la conductibilité de l'appareil est plus grande; tandis qu'avec un courant faible les degrés de magnétisme sont d'autant plus différents que l'on interrompt davantage la communication, que la conductibilité est plus imparfaite et la tension plus forte. Il a reconnu que si on laisse fonctionner longtemps l'appareil voltaïque, la différence d'aimantation des deux aiguilles, l'une sans enveloppe et l'autre enveloppée d'un cylindre métallique, devient de plus en plus grande à mesure que l'action est moins vive. Il paraît que l'influence amortissante des enveloppes croît un peu avec leur épaisseur; cependant, quelquefois les

enveloppes métalliques épaisses augmentent l'aimantation d'une quantité supérieure aux écarts possibles de ces expériences. D'après tous les faits que nous venons de rapporter, on voit combien on est éloigné encore de connaître toutes les causes qui influent sur l'aimantation.

265. M. Savary, qui a analysé avec le plus grand soin l'aimantation que des aiguilles de fer et d'acier prennent par l'action des décharges électriques ou des courants, s'est borné à exposer les faits qui préexistent à toutes les hypothèses que l'on peut faire pour les expliquer; il en a déduit cependant des conséquences générales sur la nature des courants électriques, qui s'accordent avec notre manière de voir sur les phénomènes électriques. Il pose d'abord en principe qu'une décharge électrique est un phénomène de mouvement. Il examine ensuite si ce mouvement est un transport de matière, ou s'il résulte d'une suite d'oscillations transmises du fil au milieu environnant, et dont la vitesse est diminuée par la résistance des particules agitées. Dans le premier cas, les alternatives de magnétisme opposé que l'on trouve à diverses distances d'un conducteur rectiligne, devraient être attribuées uniquement aux réactions mutuelles des particules magnétiques dans les aiguilles d'acier; mais il rejette cette hypothèse comme inadmissible avec ce qui se passe dans un fil quand sa longueur change. Il pense que tous les phénomènes qu'il a observés peuvent être déduits de l'hypothèse qui fait dépendre non-seulement l'intensité, mais le sens de l'aimantation des lois suivant lesquelles les petits mouvements s'amortissent dans le fil, dans le milieu qui l'entoure, et dans la substance qui reçoit et conserve l'aimantation. Suivant cette manière de voir, « les oscillations dans le « fil auront une vitesse absolue d'autant moindre, elles « s'étendront d'autant plus rapidement que ce fil sera « plus long, plus mince, que la résistance propre à sa « nature sera plus considérable. » C'est un moyen d'expliquer pourquoi, avec un conducteur rectiligne et une

charge donnée, il existe une longueur de fil qui produit le maximum d'aimantation. Relativement au mode d'action des enveloppes métalliques, qui tantôt accroissent, tantôt diminuent l'aimantation, M. Savary pense qu'il « suffit qu'elles amortissent dans les deux cas les petits « mouvements propagés par le fil, et que leur action ne « soit pas seulement proportionnelle à la vitesse abso- « lue de ses mouvements. Il suffit donc d'admettre pour « des déplacements infiniment petits, ce que la décou- « verte de M. Arago met en évidence pour des oscilla- « tions d'une amplitude finie. »

§ IV. *De la force magnétique que prennent des barreaux de fer doux, sous l'influence des courants électriques.*

266. Nous avons vu toutes les tentatives que l'on a faites pour former des aimants artificiels doués d'une grande énergie; mais les résultats que les anciens physiciens ont obtenus ne sont rien en comparaison des effets produits dans le fer doux par l'influence de courants électriques énergiques.

Le procédé consiste à enrouler autour de chacune des branches d'un barreau de fer doux recourbé en fer à cheval, et toujours dans le même sens, un fil de métal recouvert de soie, dans lequel on fait passer la décharge d'une pile voltaïque (fig. 108). Un seul élément, d'un pied carré de surface, suffit pour produire un effet considérable. L'aimantation est tellement énergique, suivant la grandeur du barreau et la force de la pile, que le fer à cheval peut supporter jusqu'à 1000 kilogrammes, sous l'influence du courant; dans ce cas il faut employer une batterie voltaïque dans laquelle le zinc, y compris les deux côtés de la plaque, présente une surface de cinq pieds carrés.

Afin de montrer combien est grande l'influence des courants électriques sur le fer doux pour y développer

une grande puissance magnétique, nous allons rapporter les expériences que M. Moll a faites à cet égard.

Ce physicien prit un morceau de fer doux anglais, ayant la forme d'un fer à cheval, de 0 mèt. 22 de hauteur, et de 0 mèt. 025 d'épaisseur; il enroula, autour de ce fer, en hélice, 83 fois un fil de cuivre rouge recouvert de soie, de 0 mèt. 003 de diamètre. A chacune des branches était adapté un contre-poids, qui débordait un peu des deux côtés et pesait une livre. Les deux extrémités du fil furent mises en communication, par l'intermédiaire de petits godets de bois remplis de mercure, avec les deux éléments du couple voltaïque, composé d'un baquet de cuivre rouge, dans lequel plongeait une plaque de zinc, dont la surface en contact avec le liquide pouvait avoir 11 pieds anglais de surface.

A l'instant où la communication fut établie, le fer à cheval devint suffisamment magnétique pour supporter 25 kilogrammes, et avec quelques précautions on lui en fit supporter 38. Un fer à cheval, du poids de 13 kilogrammes, de 0 mètre 3 de hauteur et de 55 millim. d'épaisseur, est parvenu à porter 77 kilogrammes.

L'effet est instantané, comme nous l'avons dit; en changeant la direction du courant, le renversement des pôles a lieu aussitôt, bien que l'effet magnétique persévère pendant quelque temps après que le courant a cessé de circuler, car M. Moll assure que le fer à cheval qui servait à ses expériences pouvait porter encore 25 kilogrammes, un quart d'heure après que la pile eut cessé de fonctionner.

L'aimant porte la plus forte charge à l'instant où l'on établit la communication avec la pile. En augmentant successivement la charge, si elle vient à tomber, on ne peut lui faire reprendre celle qu'elle avait d'abord. Cet effet est facile à concevoir, puisque l'on sait que l'action électro-dynamique a ordinairement le maximum d'intensité à l'instant où la pile commence à fonctionner.

M. Moll, en soumettant le fer à cheval à l'action de deux ou plusieurs éléments voltaïques, a observé que la puissance magnétique n'acquérait pas plus d'intensité qu'avec un seul. Ce fait démontre que la force de l'aimantation dépend de la vitesse du courant, qui diminue avec le nombre d'éléments dont se compose la pile.

Un fer à cheval en cuivre, soumis à la même épreuve que celui de fer doux, ne reçoit de la part du courant aucune force magnétique.

Un barreau d'acier courbé en fer à cheval, et aimanté d'avance, soumis à l'action des courants électriques, n'en reçoit pas une nouvelle force magnétique.

267. Plusieurs physiciens se sont occupés de la construction des aimants électro-magnétiques, comme nous l'avons vu dans la notice historique. M. Henry est également un de ceux qui ont traité cette question. Nous allons rapporter l'appareil dont il a fait usage (1). Il courba, en forme de fer à cheval, une barre de fer doux, de 2 pouces carrés et de 20 pouces de longueur, haute de 9 pouces $\frac{1}{2}$; les extrémités de la barre furent d'abord un peu arrondies avec un marteau; une pièce de fer de la même barre, pesant 7 livres, fut aplanie à la surface pour servir d'armature; les extrémités des branches du fer à cheval furent appuyées sur la surface de l'armature : autour de ce fer à cheval il enroula un fil de cuivre de 540 pieds, en neuf tours de 60 pieds chacun; les différentes extrémités étaient séparées, afin de pouvoir varier les combinaisons des fils, joignant la seconde extrémité du premier à la première extrémité du second fil, et ainsi dans toutes les séries, de manière à avoir des spirales à long fil ou à fil court. Le fer à cheval fut suspendu à un fort châssis de bois rectangulaire; une barre de fer fut fixée sous l'aimant, de manière à agir comme un levier du second ordre;

(1) The American journal of Sc. and Arts, vol. XIX, n° 2.

les différents poids supportés furent mesurés au moyen d'un poids qui glissait comme dans une balance romaine.

Dans une des expériences que fit M. Henry, ce physicien s'est servi d'une petite batterie, formée d'une plaque de zinc longue de 12 pouces et large de 6, et entourée de cuivre. En faisant fonctionner tous les fils, le fer à cheval put supporter un poids de 750 livres.

268. M. Moll n'avait fait qu'indiquer l'influence de la grandeur des éléments voltaïques, pour développer la force magnétique dans le fer doux; MM. Lipkens et Quetelet ont repris ce travail, nous allons donner ici le résultat de leurs recherches.

Ces deux physiciens prirent un barreau de fer, courbé en fer à cheval, pesant 2 kilogrammes, et autour duquel était enroulé un fil de cuivre recouvert de soie 83 fois sur lui-même. Les extrémités de fil ayant été mises en communication avec un élément voltaïque, de forme rectangulaire, dont le zinc sur un des côtés présentait 4 pieds $\frac{1}{3}$ de surface, la lame de zinc fut enfoncée graduellement dans le liquide conducteur.

1er Essai. La lame enfoncée de 2 pouces $\frac{1}{2}$, le fer à cheval supporta 18 kilogrammes.

2e Essai. Le zinc ayant été retiré, puis enfoncé une seconde fois à 2 pouces $\frac{1}{2}$ de profondeur, le fer à cheval ne porta plus que 8 kilogrammes.

3e Essai. Le zinc ayant été enfoncé une troisième fois à 20 pouces $\frac{3}{4}$, l'aimant ne put supporter que 17 kilogrammes.

4e Essai. Quoique le zinc plongeât de 23 pouces, le poids supporté ne fut que de 13 kilogrammes.

5e Essai. La lame étant plongée entièrement, le fer ne put pas porter plus de 16 kilogrammes.

La plus forte charge fut donc obtenue, au commencement de l'expérience, lorsque la lame fut plongée pour la première fois, et seulement de 2 pouces $\frac{1}{2}$: ce qui démontre bien que l'effet produit est en rapport avec l'énergie de l'action chimique.

6[e] Essai. Les expériences précédentes ayant été interrompues pendant assez de temps pour que le zinc séchât, on le replongea brusquement en entier dans le liquide, et le fer à cheval devint apte alors à supporter 33 kilogrammes.

Ce résultat montre que l'on peut obtenir des effets magnétiques très-puissants avec des éléments voltaïques d'une surface peu étendue, pourvu que l'action chimique soit énergique.

MM. Liplkens et Quetelet ont fait une autre expérience avec un élément voltaïque dont la lame de zinc n'avait que 2 $\frac{13}{16}$ pieds carrés de surface d'un côté; la charge fut dans un premier essai de 17 kilogrammes, et dans un second, de 14.

En variant les dimensions des éléments voltaïques et des morceaux de fer, ces deux physiciens ont conclu des résultats qu'ils ont obtenus, que l'énergie des effets dépendait moins de la grandeur des premiers que de celle des seconds; de sorte qu'en opérant avec des éléments voltaïques de grandeur assez médiocre, et de gros barreaux de fer doux, courbés en fer à cheval et enveloppés un grand nombre de fois par un fil conducteur, on pouvait augmenter considérablement les effets.

§ V. *De la conservation de la puissance magnétique dans le fer doux.*

269. On sait qu'il est extrêmement difficile de se procurer du fer doux privé de toute force coercitive; aussi quand un barreau de fer doux a été soumis à l'action par influence d'un aimant, conserve-t-il une polarité magnétique plus ou moins faible.

M. Watkins (1) a fait quelques expériences pour connaître plusieurs des circonstances où le fer doux est capable de conserver la puissance magnétique qu'on lui

(1) Philos. Transac., 1833, 11[e] p., p. 333.

fait acquérir par un moyen quelconque. Il s'est servi pour cela de quatre barres circulaires de fer doux, de 18 pouces de long et d'un pouce de diamètre. Ces barres ont été courbées en forme de fer à cheval, et garnies d'une armature de fer doux. Un fil de cuivre, d'environ 20 pieds de long, d'un quinzième de pouce d'épaisseur, a été enroulé autour de chaque fer à cheval. On mit ensuite en communication les extrémités de ce fil avec les deux pôles d'une batterie voltaïque, composée d'un seul élément. Pendant que le courant traversait l'hélice, le fer doux supportait un poids de 120 livres; en interrompant la communication avec la batterie, le fer à cheval ne supporta plus qu'un poids de 56 livres. Ce poids ayant été enlevé, on mit de côté le fer à cheval en prenant la précaution de ne pas déranger l'armature. Le pouvoir de suspension du fer à cheval fut essayé chaque jour, et on trouva qu'il supportait toujours 56 livres : en enlevant violemment l'armature, tout le magnétisme disparut.

Cette propriété du fer doux, quand les deux extrémités de la barre sont réunies par une armature, subsiste pendant plusieurs semaines, et probablement pendant un temps plus considérable. Les barres en fer à cheval ayant été rendues magnétiques par attouchement et par frottement, on reconnut encore que la polarité subsistait aussi long-temps que l'union entre les extrémités n'était pas interrompue; mais aussitôt qu'elle était détruite, tout le magnétisme disparaissait.

M. Watkins a remarqué qu'en séparant l'armature, si cette séparation arrivait immédiatement après que le fer doux avait été saturé de magnétisme, ou après qu'il avait servi à le conserver pendant quelques semaines, il restait encore au fer doux une petite quantité de magnétisme libre.

Il a remarqué, en expérimentant avec des aimants électriques qui pouvaient supporter des poids de 4 à 500 livres, que lorsque l'armature glissait en avant ou en arrière sur les extrémités de la barre en fer à

cheval, on ne voyait qu'une ou deux faibles raies, soit sur les pôles, soit sur l'armature; conséquemment il n'y avait eu de contact métallique que dans les endroits où étaient ces raies, et cependant les surfaces étaient aussi polies que si on les avait rendues telles. Il en a conclu que le pouvoir de suspension des aimants électriques était dépendant d'une *induction* complexe; que tous les phénomènes magnétiques appartenant à cette classe d'effets avaient leur origine dans cette influence appelée induction.

CHAPITRE III.

DES ACTIONS EXCITÉES DANS TOUS LES CORPS PAR L'INFLUENCE DES COURANTS ÉLECTRIQUES OU DES AIMANTS.

§ Ier. *Des actions magnétiques produites dans différents minerais de fer par l'influence des courants électriques.*

270. Peu de temps après la découverte du multiplicateur, je cherchai l'action qui serait produite sur une aiguille d'une substance quelconque, substituée à l'aiguille aimantée, quand on fait passer la décharge d'une batterie voltaïque à travers le fil de l'appareil, pour avoir un courant d'une grande intensité. J'annonçai alors que ce courant avait la propriété de ramener l'aiguille dans le plan des circonvolutions; mais ayant eu l'occasion de répéter cette expérience, je me suis convaincu que les premiers effets observés devaient être attribués à des courants d'air dus à la chaleur dégagée dans le fil pendant le passage du courant : dès lors je renonçai à l'espoir de pouvoir agir par ce moyen sur les aiguilles de bois, de verre, etc.

Je voulus voir ce qui se passe quand on opère avec des petites cartouches de papier, d'un millimètre de diamètre, remplies de deutoxide de fer, ou d'un mélange de deutoxide et de tritoxide; en général, la cartouche est attirée dans le plan de l'appareil, et après quelques oscillations, elle se place dans le sens des circonvolutions. Si l'on cherche la distribution des pôles dans la

cartouche, avec un petit barreau aimanté, on trouve que le même pôle agit de la même manière sur tous les points qui sont situés sur la même face ; ainsi la distribution du magnétisme s'est opérée dans le sens transversal du fil, au lieu d'être faite dans le sens longitudinal, comme dans les aiguilles aimantées ordinaires.

Si l'on veut avoir une distribution du magnétisme dans le sens longitudinal, il suffit de maintenir, pendant quelques instants, la cartouche qui renferme du deutoxide de fer dans la direction perpendiculaire aux circonvolutions ; on peut même, avec quelques précautions, lui faire acquérir une aimantation telle que la cartouche se maintienne à 45°, par rapport à la direction des circonvolutions.

Quand la cartouche ne renferme que du tritoxide de fer, il n'y a qu'une seule position possible d'équilibre pour elle, c'est celle de la direction des circonvolutions.

Si l'on compare ces résultats à ceux que nous avons obtenus, dans les recherches relatives à l'action des barreaux aimantés sur tous les corps, nous voyons qu'ils sont les mêmes, mais dans les cas seulement où l'on emploie un seul barreau, ou bien que les deux pôles sont très-rapprochés.

§ II. *Des courants électriques produits par l'influence des courants électriques.*

271. Dans le chapitre (1) précédent, nous nous sommes occupés de l'action par influence des courants électriques sur les aiguilles d'acier aimantées ou non ; nous allons continuer les mêmes recherches sur tous les métaux, et en général sur tous les corps. Cette branche de la physique a été créée par M. Faraday (2), qui en a développé toutes les parties avec sa sagacité ordinaire.

(1) I[er] de ce Livre.
(2) Philos. trans., 1831.

Voici les expériences fondamentales qui montrent l'action produite dans les métaux par l'influence d'un courant électrique:

Si l'on enroule en spirale, sur un cylindre de bois, 12 spirales, formées chacune de 26 pieds de fil de cuivre, d'un 20e de pouce de diamètre, et recouvert de soie, et que l'on réunisse à leurs extrémités, bout à bout, la 1re, la 3e, la 5e, la 7e, la 9e et la 11e, et que l'on joigne les autres de la même manière, afin de former deux spirales semblables et ayant la même direction; si l'une des spirales est mise en communication avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur, et l'autre avec une pile voltaïque, bien chargée de 10 couples à double cuivre, l'aiguille du multiplicateur n'éprouve aucune déviation.

Mais si l'on opère avec deux spirales semblables, de 203 pieds chacune de fil de cuivre recouvert de soie, dont l'une est en communication avec le multiplicateur, et l'autre avec une pile de 100 couples, à double cuivre, de 4 pouces carrés et bien chargée, à l'instant où le contact est établi l'aiguille éprouve une déviation; puis après quelques oscillations elle revient dans sa position d'équilibre, et est déviée de nouveau à l'instant où l'action de la pile est interrompue, mais dans un sens contraire; pendant tout le temps que la pile fonctionne, l'action sur l'aiguille aimantée est nulle.

M. Faraday a appelé *induction volta-électrique* ce pouvoir qu'ont les courants électriques d'exciter sur la matière qui est près d'eux l'état particulier que nous venons de décrire.

En comparant la direction du courant inducteur à celle du courant induit, on voit que l'un et l'autre cheminent dans une direction contraire; tandis que le courant produit par la cessation du courant inducteur se dirige dans le même sens que celui-ci : le courant n'ayant qu'une durée instantanée, a donc plus d'analogie avec le courant produit par la décharge de la bouteille de Leyde qu'avec celui que l'on obtient avec la pile voltaïque.

Cette conséquence se trouve confirmée par l'expérience; car si l'on substitue au multiplicateur une petite spirale creuse, et que l'on introduise dedans une aiguille d'acier, celle-ci se trouve aimantée à l'instant où on établit le contact, pourvu toutefois que l'on retire l'aiguille avant d'interrompre l'action de la pile, car le courant en sens contraire qui se produit alors détruirait l'aimantation. M. Faraday a reconnu que la force du courant d'induction est plus grande au moment où l'on opère le contact qu'à l'instant où on l'interrompt.

§ III. *Des courants électriques produits par l'influence des aimants.*

272. On prend un anneau formé avec une barre ronde de fer doux de $\frac{7}{8}$ de pouce d'épaisseur, et ayant 6 pouces de diamètre; on enroule autour d'une partie de cet anneau (fig. 43) trois spirales, chacune de 24 pieds environ, de fil de cuivre de $\frac{1}{20}$ de pouce d'épaisseur et recouvert de soie, occupant sur l'anneau une longueur d'environ 9 pouces, comme l'indique la figure; ces trois spirales, qui peuvent être employées séparément ou ensemble, forment un groupe marqué A. Sur la partie B, on enroule de la même manière en spirale, dans la même direction, 60 pieds environ du même fil, dont les deux bouts sont mis en communication avec un multiplicateur placé à 3 pieds de distance. Les fils de A sont joints à leurs bouts de manière à former une longue spirale dont les extrémités sont mises en communication avec une pile de 10 couples de 4 pouces carrés. L'aiguille est alors déviée bien au-delà de ce qu'on avait remarqué en employant une pile d'une forme décuple sans l'intervention d'un barreau de fer. Dans cette expérience comme dans l'autre, l'effet n'est pas permanent, car l'aiguille reprend aussitôt sa position d'équilibre et se dévie dans un sens inverse en interrompant la communication avec la batterie.

Quand la communication avec la pile est établie, l'aiguille du multiplicateur se dirige d'un côté ; elle marche dans une direction contraire quand on intervertit le sens du courant. Si l'on emploie l'action d'une pile de 100 couples, l'aiguille tourne rapidement 4 ou 5 fois sur elle-même avant d'osciller. Si l'on place aux extrémités de la spirale B deux petits morceaux de charbon bien recuits et effilés, on aperçoit une petite étincelle lorsque le contact de la pile avec A est établi ; il est beaucoup plus difficile de l'apercevoir à l'instant où l'on interrompt la communication avec la pile.

On peut faire l'expérience d'une autre manière qui rend plus sensible l'effet résultant du barreau aimanté. On enroule sur un cylindre creux de carton 220 pieds de fil de cuivre divisés en huit longueurs, de manière à pouvoir agir séparément ou réunis. Quatre sont joints bout à bout et mis en rapport avec le multiplicateur, et les quatre autres, réunis de la même manière, communiquent avec une pile de 100 couples. L'effet sur l'aiguille est à peine sensible, comme on l'a vu dans la première expérience. Mais si l'on introduit dans le tube de carton un cylindre de fer doux de l'épaisseur de $\frac{7}{8}$ de pouce, et long de 12 pouces, on obtient une déviation très-forte. En substituant au cylindre de fer un cylindre d'un autre métal, on n'a que l'effet dû aux spirales.

273. On obtient des effets semblables avec les aimants ordinaires ; il suffit d'attacher au multiplicateur toutes les spirales élémentaires de la spirale creuse précédente, et d'introduire dans son axe le cylindre de fer doux, puis de placer deux barreaux aimantés, longs de 24 pouces chacun, de manière que, d'un côté, leurs pôles opposés étant mis en contact entre eux, les deux autres puissent être mis en contact également avec les deux bouts du cylindre de fer, pour le transformer momentanément en un aimant.

A l'instant où le contact est établi, l'aiguille est déviée, puis reprend sa position d'équilibre ordinaire et se dévie dans un autre sens quand on retire les bar-

reaux. Les effets sont différents, suivant que l'aimantation a lieu dans un sens ou dans un autre.

A l'instant où le contact magnétique a lieu, la déviation de l'aiguille indique un courant induit d'électricité par influence dont la direction est contraire au courant qu'on aurait employé pour développer dans le fer doux un magnétisme de la même polarité que le magnétisme réellement produit par le contact avec les barreaux aimantés.

Pour prouver que le courant passager est dû à l'aimantation par influence, on lie ensemble, avec un fil de cuivre, tous les bouts analogues de la spirale creuse, et l'on met en communication les deux extrémités avec un multiplicateur. On ôte le cylindre de fer doux, et on le remplace par un aimant cylindrique de $\frac{3}{4}$ de pouce en diamètre, et de 8 pouces et demi en longueur. Le bout de cet aimant est placé dans l'axe de la spirale. En introduisant tout à coup l'aimant, il en résulte immédiatement une déviation dans l'aiguille, dont la direction est la même que si l'aimant eût été formé par influence; en le retirant, les effets sont inverses. Si l'on fait traverser l'aimant dans la spirale, il se produit les phénomènes suivants :

Quand on porte rapidement le milieu d'un aimant dans la spirale creuse, la déviation de l'aiguille aimantée est trois ou quatre fois plus considérable que celle que l'on obtient en y plaçant le pôle du même aimant ; en sortant l'aimant du cylindre, la déviation a naturellement lieu en sens contraire; mais elle est la même par quelque côté du cylindre creux qu'on retire l'aimant.

274. M. Faraday a fait quelques expériences avec le grand aimant de la Société royale, dont nous avons déja donné la description. Les fig. 109 et 110 représentent cet aimant, qui est disposé dans une boîte de manière à présenter deux pôles extérieurs à une de ses extrémité. La force de cet aimant est telle, qu'un cylindre de fer doux de $\frac{3}{4}$ de pouce en diamètre, et de 12 pouces de longueur, exige une force de 100 livres pour en détruire le con-

tact. Le multiplicateur qui servait aux expériences était placé à 8 pieds de distance. Le cylindre de fer doux, avant d'être mis en contact avec les pôles, fut introduit d'avance dans la spirale creuse composée, dont les bouts, réunis à leurs extrémités, avaient été mis en communication avec le mutiplicateur. Le développement de l'électricité fut si puissant, que l'aiguille fit plusieurs révolutions de suite, et tous les effets exposés précédemment se reproduisirent.

En supprimant les hélices, et passant les fils du multiplicateur sur la barre de métal, comme l'indique la fig. 110, l'aiguille fut fortement déviée. Comme on devait s'y attendre, M. Faraday obtint des effets également puissants lorsque la spirale avec son cylindre de fer furent placés à peu de distance des pôles magnétiques.

Toutes les expériences précédentes prouvent de la manière la plus évidente le dégagement de l'électricité par l'influence du magnétisme ordinaire.

§ IV. *Nouvel état électrique de la matière pendant l'induction.*

275. M. Faraday s'est rendu compte des phénomènes d'induction en supposant un nouvel état électrique dans la matière. Il admet, en s'appuyant sur l'expérience, que, lorsqu'un fil de métal est soumis à l'induction volta-électrique ou magnéto-électrique, il paraît être dans un état particulier, puisqu'il résiste à la formation d'un courant électrique qui n'a réellement lieu qu'à l'instant où commence et cesse cet état particulier auquel il a donné le nom d'*électro-tonique*. Pendant cet état, la matière ne possède aucune des propriétés relatives aux corps électrisés ou aimantés.

M. Faraday considère l'état électro-tonique comme un état de tension, équivalent à un courant électrique au moins égal au courant qui est produit lorsque l'induction a lieu, ou lorsqu'elle est supprimée. Il regarde les résultats qu'il a obtenus comme venant à l'appui du

principe que l'état électro-tonique est relatif aux particules et non à la masse du fil et de la substance assujétie à l'induction.

Une question importante a attiré à ce sujet son attention : le courant d'électricité excitant un état électrotonique dans un fil métallique voisin, doit probablement en produire un semblable dans son propre fil; car, ajoute cet habile physicien, « lorsque, par le passage d'un courant dans un fil, on rend électro-tonique un fil voisin, ce dernier état ne devient nullement incompatible avec un courant d'électricité qui traverse le fil; c'est pourquoi si, au lieu de faire passer le courant dans le premier fil, on le fait passer dans le second, il n'y a pas de raison de croire que son action inductive sur ce second fil en éprouve une diminution; elle devrait au contraire être plus forte, parce que la distance entre l'agent et la matière qui le subit serait très-considérablement diminuée. »

276. M. Faraday pense que, lorsque les courants électriques passent à travers les corps, ceux-ci subissent l'état électro-tonique, et que c'est à cet état que sont dues les décompositions électro-chimiques; que dans l'état électro-tonique, les molécules homogènes de la matière prennent une disposition électrique régulière, mais forcée, dans la direction du courant, disposition qui produit, lorsqu'elle cesse, un courant en retour si la matière est indécomposable; tandis que, si elle est décomposable, un pareil état forcé peut suffire pour qu'une molécule élémentaire quitte sa compagne avec laquelle elle se trouve dans un état de contrainte, pour se joindre à une molécule voisine, analogue, par rapport à laquelle elle est dans une condition plus naturelle, la disposition électrique forcée se trouvant elle-même à l'instant détruite aussi efficacement que si le corps était soustrait à l'induction; ainsi de suite tout le long du circuit.

Nul doute que, pendant l'action par influence d'un courant électrique sur un fil de métal placé à peu de distance, le principe électrique de ce fil ne soit dans

un état de tension que les particules matérielles doivent partager probablement; mais nous pensons que l'on peut envisager le phénomène de la manière suivante: toutes les particules sont entourées du principe électrique, qui remplit par conséquent les interstices qu'elles laissent entre elles, et qui exerce sur elles une action quelconque, d'où peuvent résulter un grand nombre de phénomènes que nous étudierons dans le troisième volume.

A l'instant où le courant électrique commence, on peut concevoir qu'il réagit sur une portion de l'électricité du corps voisin, de manière à en chasser une portion et à en attirer l'autre, comme il arrive dans le dégagement de l'électricité par influence; mais avec cette différence néanmoins que dans le cas que nous considérons, le principe électrique donne naissance à deux courants, l'un dirigé dans un sens différent du courant inducteur qui est chassé, et l'autre dans un sens différent qui est attiré à lui et cesse d'agir, puis devient libre aussitôt que le courant inducteur cesse.

§ V. *Explication des phénomènes magnétiques de M. Arago au moyen de l'induction magnétique.*

277. Aussitôt après la découverte de l'induction électro-magnétique, M. Faraday essaya de construire une machine électrique au moyen de l'induction terrestre magnéto-électrique, en s'appuyant sur les expériences de M. Arago. Il se servit à cet effet de l'aimant de la Société royale de Londres. Afin de rapprocher l'un de l'autre les deux pôles, il plaça transversalement, comme l'indique la fig. 111, deux barres de fer ou d'acier de 6 à 7 pouces en longueur chacune, de 1 pouce en largeur et de $\frac{1}{2}$ pouce en épaisseur.

Un disque de cuivre de 12 pouces de diamètre et de $\frac{1}{5}$ de pouce d'épaisseur fut fixé sur un axe d'airain et monté de manière à pouvoir tourner verticalement ou horizontalement, et qu'en même temps on puisse in-

troduire plus ou moins son bord entre les pôles magnétiques. On couvrit d'amalgame le bord du disque, afin d'obtenir un contact mobile; la partie du disque autour de l'axe fut préparée de la même manière ; des conducteurs de cuivre ou de plomb de 4 pouces environ de long, de $\frac{1}{2}$ pouce de large et de $\frac{1}{5}$ pouce d'épaisseur, furent évidés à l'une de leurs extrémités et munis d'amalgame pour être appliqués avec plus d'exactitude sur les bords du platcau. On mit les conducteurs en communication avec un multiplicateur dont le fil de cuivre entouré de soie formait autour du châssis 16 ou 18 circonvolutions. Les choses étant ainsi disposées, les pôles magnétiques se trouvant à une distance d'un demi-pouce environ l'un de l'autre, le bord du disque fut introduit entre eux jusqu'à la moitié de leur largeur environ. On attacha l'un des fils du multiplicateur autour de l'axe de rotation, et l'autre au conducteur qui était maintenu en contact avec le bord amalgamé du disque, précisément dans la partie située entre les deux pôles. Aussitôt que le disque fut mis en mouvement, l'aiguille du multiplicateur éprouva une déviation de 90°, et se mit à osciller à cause de la difficulté d'opérer un contact qui fût parfait. Mais en faisant les expériences avec soin, et régularisant le mouvement de rotation, on obtint une déviation permanente de 45°. Cette expérience démontre évidemment la production d'un courant électrique continu au moyen des aimants ordinaires. En imprimant un mouvement de rotation en sens inverse, sans faire aucun autre changement à l'appareil, la déviation fut en sens contraire. Quand le conducteur était placé au bord du disque, comme on le voit dans les positions ponctuées de la fig. 112, le courant avait toujours la même direction, et il en était encore de même jusqu'à une distance de 50 ou 60° de chaque côté des pôles magnétiques; mais le courant allait en décroissant à partir du point de la plus grande intensité qui se trouvait entre les deux pôles. A une égale distance des pôles magnétiques le courant avait la même intensité; il n'y

avait renversement de pôles que lorsque la rotation avait lieu dans un autre sens.

278. Lorsqu'on éleva le disque jusqu'à ce que les pôles magnétiques fussent complétement cachés l'un à l'autre par son interposition (fig. 113) les résultats étaient absolument les mêmes ; en l'élevant encore plus haut, de manière que *c* fût la place des pôles, les résultats furent encore les mêmes. Lorsque le conducteur était appuyé sur les bords du disque et qu'il en suivait le mouvement entre les pôles, l'aiguille aimantée fut déviée de peu de degrés, et indiquait un courant électrique tel qu'on l'aurait obtenu en faisant tourner la roue dans la même direction, et en retenant le conducteur stationnaire.

En mettant en contact les deux conducteurs avec les bords du disque de cuivre, M. Faraday obtint également des courants électriques ; en appliquant les fils, comme l'indique la fig. 114, le multiplicateur indiquait un courant ; mais pour peu que leur place fût changée, comme dans la fig. 115, le courant était dirigé en sens contraire. Dans le premier cas, le multiplicateur indiquait la différence entre un courant énergique à travers A, et un faible courant à travers B ; dans le second c'était le contraire ; d'où devait résulter une déviation dans un sens opposé. Quand les deux conducteurs étaient équidistants des pôles magnétiques, comme dans la fig. 116, l'aiguille aimantée n'éprouvait aucune déviation ; résultat facile à concevoir, puisque les deux courants égaux étaient dirigés en sens inverse.

279. M. Faraday disposa ses appareils pour rendre les résultats indépendants du magnétisme terrestre, ou de l'influence mutuelle des aimants et des aiguilles du multiplicateur. Il opéra les contacts à l'équateur magnétique du disque et en d'autres endroits. Le disque fut placé horizontalement, les pôles verticalement ; l'absence de toute action autre que l'action principale se fit promptement reconnaître par le défaut absolu de résultats, lorsque le disque était éloigné des pôles.

Pour établir la relation du courant électrique produit par l'influence du pôle magnétique avec la direction de rotation du disque, M. Faraday a remarqué que lorsque le pôle austral est au-dessous du bord du disque, et que ce dernier tourne horizontalement à la manière d'une vis, l'électricité qui est recueillie au bord du disque le plus près du pôle est positive.

Si le pôle boréal est placé au-dessus, rien n'étant changé du reste (fig. 117) l'électricité en B est encore positive; s'il est placé au-dessous ou bien si l'on place le pôle austral au-dessus, il y a renversement dans l'électricité.

Il résulte des faits précédents, que l'expérience du disque en rotation revient à celle par laquelle on fait passer un morceau de métal entre les pôles magnétiques dans une direction rectiligne; dans ce cas, il y a des courants électriques produits à angles droits à la direction du mouvement, et qui traversent cette direction à l'endroit des pôles ou du pôle magnétique. Ce fait peut être rendu sensible par une expérience très-simple : on place entre les pôles magnétiques un morceau de cuivre amalgamé sur ses bords, qui communiquent avec les deux bouts du multiplicateur. Si l'on tire la plaque dans la direction de la flèche (fig. 118) l'aiguille du multiplicateur est aussitôt déviée, et le sens de la déviation indique que le fil A reçoit l'électricité négative : en renversant le mouvement de la plaque, l'effet est contraire. Nous ne suivrons pas M. Faraday dans toutes les expériences qu'il a faites pour montrer les courants électriques qui sont produits en différents points de la plaque de cuivre en mouvement, et leurs différents rapports avec les pôles excitateurs, parce que nous serions entraînés dans des expériences dont les développements donneraient trop d'étendue à cet ouvrage. Je dirai seulement que les faits qu'il a observés, et particulièrement ceux que nous avons rapportés précédemment, l'ont mis à même de conclure que le courant électrique, qui est excité dans un métal mis en mouvement auprès d'un

aimant, dépend entièrement, quant à sa direction, des rapports de position du métal avec la résultante de l'action magnétique, ou avec les courbes magnétiques dont on détermine la position avec la limaille.

On peut indiquer ces rapports de la manière suivante, d'après M. Faraday:

280. Soient A B (fig. 119) un cylindre magnétique, dont le pôle qui est tourné vers le nord soit désigné par A, et P N une lame de couteau d'argent placée en travers de l'aimant, le tranchant en haut et le bord entaillé tourné vers A. Quelles que soient la direction et la position que prenne le couteau, le tranchant étant toujours en avant, tant vers le pôle austral que vers le pôle boréal, le courant ira toujours de P en N, pourvu que les courbes qui procèdent de A, rencontrent la surface entaillée du couteau, et que celles qui partent de B rencontrent la surface non entaillée.

Si le couteau est mû avec le dos en avant, le courant chemine de N à P. Il semble donc que l'induction des courants électriques soit excitée circulairement par une résultante magnétique ou axe de puissance, de même que le magnétisme circulaire dépend d'un courant électrique et est représenté par lui. Il paraît démontré maintenant que lorsqu'on fait passer une pièce de métal, soit devant un simple pôle, soit entre les pôles opposés d'un aimant, il en résulte des courants électriques à travers le métal, transversalement à la direction du mouvement, lesquels, dans les expériences de M. Arago, approchent de la direction des rayons. Si donc l'on fait mouvoir un simple fil, comme le rayon d'une roue, près d'un pôle magnétique, il se manifeste dans toute la longueur du fil un courant électrique. Si l'on considère maintenant une roue, comme formée de la réunion d'un nombre infini de ces rayons tournants près du pôle, de la même manière que le disque de cuivre, on aura dans chaque rayon un courant électrique, à l'instant où il passera près du pôle.

Voici maintenant l'explication que donne M. Faraday

des phénomènes de rotation découverts par M. Arago, dans lesquels il ne voit qu'un effet des rotations électro-magnétiques qu'il a le premier observées, et dont nous parlerons dans le livre suivant. Soit (fig. 120) un fil métallique PN, en communication avec les deux pôles d'une pile ; si l'on place le pôle nord d'un aimant près du fil, ce pôle se mouvra autour du fil à droite, et le fil se mouvra à gauche, comme les flèches l'indiquent. Cet effet est précisément celui qui se produit pendant la rotation d'un disque placé sous un pôle magnétique. Soit N ce pôle (fig. 121) qui est au-dessus du disque ; si ce dernier tourne dans le sens de la flèche, il se produira aussitôt des courants électriques, qui iront des parties centrales par le pôle, dans la direction des rayons, aux points de la circonférence *a* de l'autre côté du même pôle. Ces courants se trouveront dans la même position que le courant du fil PN de la fig. 120 ; le pôle devra se mouvoir vers la droite. On explique de la même manière ce qui se passe quand le mouvement de rotation a lieu dans un autre sens, ou que le pôle sud est tourné vers le disque. Si l'on suppose maintenant que les deux pôles réagissent en même temps sur le disque, le courant suivra la même direction, et l'aiguille sera entraînée jusqu'à ce que la force du courant fasse équilibre à la résultante des forces magnétiques du globe.

M. Faraday en s'appuyant sur les mêmes principes a donné l'explication des trois composantes de la force que l'aimant développe dans la plaque tournante; il a montré aussi pourquoi les solutions de continuité dans le disque diminuent sa puissance, et comment il se fait que l'action est augmentée lorsque les entaillures sont remplies de substances métalliques. Quant aux très-faibles effets produits dans les disques de verre, de résine et les gaz, il en trouve la cause dans la non conductibilité de ces substances.

§ VI. *Détermination de tous les courants électriques produits dans les disques en mouvement par les aimants.*

281. MM. Nobili et Antinori, quelque temps après la publication des premiers travaux de M. Faraday sur l'induction électro-magnétique, ont imaginé un procédé très-simple pour découvrir la distribution des courants produits par l'influence des aimants sur les disques tournants.

Ce procédé consiste à appliquer les deux extrémités du fil d'un multiplicateur, terminées par deux pointes coniques, sur le disque de cuivre en mouvement. Ces pointes sont assez épaisses, et offrent assez de résistance pour ne pas fléchir sous la pression qu'on leur fait supporter pour les maintenir en contact avec le disque. On les promène successivement sur la surface pour découvrir les courants qui s'y forment.

MM. Nobili et Antinori ont présenté le barreau aimanté à l'action des disques, de deux manières, auxquelles ils ont donné le nom de *centrale* et d'*excentrique*. Suivant la première, le barreau est suspendu verticalement au-dessus du centre du disque; suivant la seconde, il est placé en dehors. Dans le premier cas, le multiplicateur n'est pas affecté; dans l'autre, on obtient plusieurs résultats que voici : le disque D (fig. 122) tourne dans le sens de la flèche R, et l'aimant, dont la projection est indiquée par *n*, tourne son pôle nord vers le disque. Les petites flèches indiquent la direction des courants que l'on suppose exister dans les aimants suivant la théorie de M. Ampère, dont il sera question plus tard. Les points du disque, qui entrent successivement sous l'influence du pôle N, possèdent le magnétisme central *n*, *n*, *n*, et ceux qui en sortent le magnéetisme boréal.

Aussitôt que la rotation commence, tous ces points deviennent les foyers des courants, dont l'action se manifeste sur le multiplicateur. Dans les parties *n*, *n*, *n*,

qui entrent, la direction des courants est contraire à la direction que suivent les courants dans les points qui sortent.

MM. Nobili et Antinori ont commencé par examiner la direction des courants sur les points A B ; l'une des pointes a été placée en A et l'autre en B ; on a eu un courant dans le sens de la flèche ; elles ont été transportées ensuite de l'autre côté, et l'on a trouvé un courant dirigé en sens inverse, comme l'indique la fig. 123. Quant aux arcs intérieurs entre l'aimant et le centre, les courants ba, $a'b'$, sont dans une direction opposée à ceux des courants extérieurs A B, B'A'. Ils en ont tiré la conséquence que, dans les parties qui entrent, il se développe un système de courants contraires à celui qui se produit de l'autre côté ; et que sur les parties qui entrent, la direction des courants est contraire à celle des courants producteurs, tandis que de l'autre côté ils cheminent dans le même sens.

282. Après avoir analysé tous les effets produits sur les disques quand le barreau est placé dans une position verticale, et ne présentant qu'un seul pôle, MM. Nobili et Antinori ont cherché la distribution des courants lorsqu'il est suspendu dans une position horizontale, et qu'il agit par conséquent sur le disque par ses deux pôles. La fig. 124 indique cette distribution.

Nous avons dit que l'action que le disque circulaire horizontal, et tournant sur son propre centre, exerce sur l'un des pôles d'une aiguille aimantée, pouvait être décomposée en trois autres, dont M. Arago a démontré l'existence : la première, verticale ou perpendiculaire au disque ; la deuxième, horizontale et perpendiculaire au plan vertical qui contient le rayon sur lequel tombe la projection du pôle de l'aiguille ; la troisième, ayant une direction parallèle au même rayon.

Or, il existe sur le disque des forces qui attirent l'aiguille, et d'autres qui la repoussent, comme on peut le voir sur la figure. Les premières se trouvent dans les parties qui s'éloignent de l'influence de l'aimant ; les

secondes dans les parties qui s'en approchent. Dans leur ensemble la somme des forces attractives est balancée par celle des forces répulsives, mais leur distribution n'est pas la même relativement à l'aiguille sur laquelle elles agissent. MM. Nobili et Antinori ont remarqué que les forces répulsives, qui sont les plus proches, envahissent le disque jusque sous l'aiguille, et l'emportent sur l'action des forces contraires, qui s'exercent plus obliquement et de plus loin.

Voyons quelle est la force tangentielle qui imprime aux aiguilles le mouvement horizontal. Supposons que le cylindre vertical, dont nous avons étudié l'effet dans la fig. 122, soit mobile autour du centre de rotation du disque; il sera attiré par les forces *s*, *s*, tandis qu'il sera poussé du même côté par les forces répulsives qui existent en *n*, *n*, *n*. C'est en raison de ces deux forces qui se développent sous lui qu'il entre en rotation. En employant des aiguilles horizontales, c'est-à-dire en opérant avec deux pôles, l'effet se trouve doublé, comme on le voit facilement sur la figure.

La composante qui agit parallèlement aux rayons du disque, et dont on reconnaît l'existence au moyen d'une aiguille d'inclinaison verticale, produit des effets très-compliqués. La fig. 125 indique les effets obtenus sur les différents points d'un même rayon. DD est la projection verticale du disque, *c* son centre; S N, S′N′, S″N″, indiquent les diverses directions que prend l'aiguille d'inclinaison verticale, conformément aux observations de M. Arago. Voyons comment on peut expliquer ces effets : quand l'aiguille est placée au centre *c*, comme nous l'avons vu, elle conserve sa verticalité, ainsi qu'à un autre point qui est plus près de la circonférence que du centre. Entre ces deux positions, l'aiguille prend les directions indiquées par la figure. Représentons par DD la projection horizontale du disque, et par N celle de l'aiguille d'inclinaison; autour de ce point il existe sur le disque des forces répulsives qui tendent à soulever l'aiguille; ces forces exercent leur action à une cer-

taine distance. Supposons que le cercle *n n' e n'* représente la limite de ces forces, on voit que l'aiguille penche du côté de la circonférence, à cause des forces supérieures qui existent du côté du centre; car de ce côté il y a une demi-circonférence *n n n*, et de l'autre il n'y a d'agissant que l'espace *n n n' n' n'*, qui a de moins l'espace *n' n' e*. Il en résulte que plus on porte l'aiguille vers le centre, plus il y a du côté extérieur de quantité de matière qui entre en action, et il y a un point où l'aiguille est également repoussée vers le centre et la périphérie; alors elle ne penche ni d'un côté ni de l'autre, et doit rester dans la ligne verticale. En continuant à avancer l'aiguille vers le centre, on se rend compte de la même manière de l'inclinaison en sens inverse. Enfin, quand elle se trouve immédiatement sur le centre, elle ne doit éprouver aucun changement.

283. MM. Nobili et Antinori ont établi un parallèle entre les effets observés par M. Arago et les courants de M. Faraday. Ils ont d'abord essayé de suivre la marche des courants qui se développent sur les disques de métal, quand, étant sous l'influence d'une aiguille aimantée, ils sont soumis à un mouvement lent de rotation; dans ce cas, les courants sont faciles à reconnaître: mais la question devient très-difficile à résoudre quand la rotation augmente de vitesse, attendu que les courants sont disséminés sur le disque, de manière à compliquer singulièrement leurs cours. Pour essayer de se rendre compte d'une partie des effets produits, les deux physiciens italiens ont adopté une disposition particulière. Ils ont fait agir sur le disque les deux pôles d'un aimant en fer à cheval, placé à une même distance du centre et sur un même diamètre, afin de satisfaire à toutes les lois de symétrie. La fig. 124 indique la distribution des courants qu'ils ont reconnus avec leurs sondes. Dans ce cas, ONES est le disque ordinaire; R R les flèches qui indiquent la direction de la rotation; N' S' la projection des pôles de l'aimant situés au-dessous.

Nous avons rapporté, avec autant d'exactitude qu'il

nous a été possible, les principales observations relatives à la découverte fondamentale de M. Faraday, ainsi que les développements qui sont dus à MM. Nobili et Antinori. Nous allons actuellement soumettre au lecteur une observation sur quelques-unes des méthodes d'expérimentation employées par ces trois physiciens.

Rappelons-nous que lorsque l'on a un fil de métal quelconque, de cuivre par exemple, et que l'on superpose l'un sur l'autre les deux bouts, quand ils n'ont pas la même température, on a toujours un courant électrique qui, pour le cuivre, va du côté chaud au côté froid. Cela posé, prenons les deux sondes de M. Nobili, plaçons l'une auprès du centre et l'autre près de la circonférence du disque, et pressons-les assez fortement sur le disque pendant qu'il tourne pour qu'elles y adhèrent continuellement; supprimons en même temps l'aiguille aimantée: il y aura évidemment dégagement de chaleur, par suite du frottement exercé par les pointes sur la surface du disque, et la chaleur dégagée sera plus forte sur la sonde qui est près du centre que sur l'autre, puisque les points qui environnent ce centre sont animés de plus de vitesse que ceux qui en sont éloignés. Eh bien, dans ce cas, on aura un courant thermo-électrique qui ira de la sonde placée près du centre à l'autre, en suivant le disque. D'un autre côté, plus le mouvement de rotation est rapide, plus le frottement est grand, et plus aussi le dégagement de chaleur est considérable, ainsi que l'intensité du courant électrique. Enfin, pour démontrer l'influence des courants thermo-électriques dans les expériences de MM. Nobili et Antinori, nous dirons qu'en plaçant les deux sondes à la même distance du centre de rotation, et appuyant plus fortement sur une sonde que sur l'autre, pour déterminer un frottement plus grand sur la première, on a encore un courant qui va de la sonde la plus pressée, là où a été le plus grand dégagement de chaleur, à l'autre. Les observations que nous venons de présenter sont de nature à être prises en considération, dans la méthode qui a été employée pour recon-

naître la présence des courants électriques sur les disques de métal qui sont soumis à un mouvement de rotation au-dessus d'un aimant.

§ VII. *De l'induction magnéto-électrique terrestre.*

284. M. Faraday a obtenu avec le magnétisme terrestre les effets qu'il avait découverts avec les aimants. Il s'est servi à cet effet de l'hélice creuse, qu'il a mise en communication avec le multiplicateur, et d'un cylindre de fer doux, qui n'avait aucune trace d'aimantation; ce cylindre fut placé dans l'hélice, qui avait été dirigée préalablement suivant l'inclinaison magnétique. Le fer devenant un aimant, l'induction se manifesta comme si on eût employé réellement un aimant : ainsi nous ne nous y arrêterons pas.

L'habile physicien anglais a rendu sensible l'induction magnéto-électrique de la terre sur la spirale, sans employer le barreau de fer doux; il a montré aussi que tous les phénomènes électriques du plateau tournant se reproduisaient sans autre aimant que la terre. Voici comment il a fait l'expérience : le disque de cuivre fut disposé de manière à tourner dans un plan horizontal; la direction de l'inclinaison magnétique coupant ce plan sous un plan de près de 70°, cet angle était assez approché de 90° pour donner naissance à l'induction magnéto-électrique, suffisante pour produire un courant d'électricité.

D'après les principes exposés précédemment, les courants tendent à passer dans la direction des rayons, soit du centre à la circonférence, soit de la circonférence au centre, suivant le sens du mouvement. L'un des bouts du fil du multiplicateur fut mis en communication avec l'axe de rotation, et l'autre, au moyen d'un conducteur, fut appliqué contre le bord du disque; l'aiguille aimantée fut déviée à l'instant où l'on fit tourner le disque; la déviation eut lieu dans un sens inverse,

lorsque la rotation allait dans une direction opposée : en étudiant le seus du courant, M. Faraday les trouva dirigées conformément à la nature des pôles magnétiques terrestres.

L'effet peut être rendu sensible avec un disque de cuivre d'un pouce et demi de diamètre, d'un cinquième de pouce d'épaisseur, dont les bords sont amalgamés afin de rendre le contact plus immédiat avec les conducteurs qui établissent la communication avec le multiplicateur.

D'après toutes les observations précédentes, il est impossible qu'un globe de métal puisse tourner sans produire des courants électriques dans son intérieur, suivant un plan perpendiculaire au plan de révolution, pourvu que l'axe de rotation ne coïncide pas avec la direction de l'inclinaison magnétique.

Pour vérifier ce fait, M. Faraday a employé un globe de cuivre de 4 pouces d'épaisseur, et vide dans l'intérieur. Une tige de cuivre fixée dans le globe servait d'axe de rotation, et une aiguille astatique, comme celle dont on fait usage dans le multiplicateur, fut employée à reconnaître les courants.

Les aiguilles se trouvaient dans le plan du méridien magnétique, et le centre du globe dans le même plan horizontal que l'aiguille supérieure. Dès l'instant que l'on imprimait un mouvement de rotation au globe (en prenant pour axe de rotation une ligne contenue dans le plan du méridien magnétique et perpendiculaire à la direction que prend une aiguille aimantée librement suspendue), la double aiguille était aussitôt déviée; cette déviation changeait avec la direction de la rotation. Quand le globe tournait de l'est à l'ouest, le pôle nord était tourné vers l'est. En mettant le globe à l'est des aiguilles, celles-ci étaient affectées de la même manière. Si l'on considère maintenant la partie supérieure du globe comme un fil de métal qui se meut de l'est à l'ouest, au-dessus du pôle sud de la terre, le courant électrique de cette partie ira du nord au sud. En envisageant éga-

lement la partie inférieure comme un fil allant de l'ouest à l'est au-dessus du même pôle, le courant électrique cheminera du sud au nord.

Si l'on incline considérablement l'axe de rotation, le globe tournant affecte aussi l'aiguille aimantée, mais à un moindre degré, et les effets disparaissent quand cet axe est peu distant de la ligne d'inclinaison magnétique. Le globe devient donc semblable à un plateau de cuivre; l'électricité d'une espèce peut être recueillie à l'équateur, et celle de l'autre au pôle. M. Faraday a observé que les déviations de l'aiguille sont exactement dans la même direction que celles que M. Barlow a obtenues par la rotation du fer : il en a conclu que la cause qui les a produites est la même.

285. L'expérience suivante, qui est très-simple, résume en quelque sorte tous les faits relatifs à l'induction magnéto-électrique. On prend (fig. 126) un fil de cuivre ordinaire de 8 pieds de long et de $\frac{1}{20}$ de pouce d'épaisseur; on l'attache par un des bouts à l'une des extrémités du fil du multiplicateur, et par l'autre bout à l'autre extrémité. On lui donne ensuite la forme d'un rectangle, dont la partie supérieure peut être portée en avant ou en arrière sur le multiplicateur, tandis que la partie supérieure et le multiplicateur qui lui est attaché restent immobiles. Toutes les fois que l'on fait passer le fil sur le galvanomètre, de droite à gauche, l'aiguille est déviée sur-le-champ; la déviation a lieu dans un autre sens, quand on fait repasser le fil en sens inverse. En répétant souvent ces mouvements, on finit par obtenir une déviation de 90 degrés. Nous ne nous arrêterons pas sur l'explication du phénomène, dans la crainte de donner trop d'étendue à ce chapitre.

Il paraît que l'effet produit sur le multiplicateur croît avec la longueur du fil mobile et l'espace qu'il parcourt.

Il est donc bien démontré maintenant qu'on ne peut mouvoir un morceau de métal en contact avec d'autres, sans produire des courants électriques. M. Faraday a fait

observer à cet égard qu'il est probable que dans la disposition des machines à vapeur, avec leur mécanisme métallique, il se forme des combinaisons accidentelles magnéto-électriques, qui produisent des effets qu'on n'a pas encore observés. Il pense, en outre, qu'en admettant que la rotation de la terre produise des courants dans sa propre masse, par l'induction magnéto-électrique, ces courants seraient (au moins à la surface) dirigés dans les parties qui approchent le plan de l'équateur en sens contraire de ceux qui auraient lieu vers les pôles; il résulte de là que si l'on pouvait appliquer des collecteurs à l'équateur et aux pôles de la terre, on trouverait de l'électricité négative à l'équateur, et de l'électricité positive aux deux pôles.

286 MM. Arago, Babbage, Herschell et Harris ont trouvé que les métaux et les autres corps ne jouissent pas tous au même degré de la faculté d'entraîner l'aiguille aimantée, quand on leur imprime un mouvement de rotation. M. Faraday a cherché s'il n'existait pas aussi des différences relatives à l'intensité du courant produit par l'induction électro-magnétique. Il a pris à cet effet deux fils, l'un de fer et l'autre de cuivre, de 20 pieds chacun de long; les ayant réunis par leurs extrémités seulement, il les tendit dans la direction du méridien magnétique, de manière à former deux lignes parallèles très-rapprochées l'une de l'autre. Le fil de cuivre ayant été coupé au milieu et ses bouts mis en relation avec le multiplicateur, il n'y eut aucune déviation. Il résulte de là, et d'autres expériences que nous ne rapporterons pas ici, que lorsque des métaux de différente nature, joints dans un circuit, sont également soumis à l'induction électro-magnétique, ils présentent exactement les mêmes propriétés par rapport aux courants qui sont formés en eux : il paraît en être de même aussi par rapport aux fluides. Il se transporta ensuite auprès d'une masse d'eau tranquille, dont les bords étaient dirigés presque du nord au sud et de l'est à l'ouest.

Ayant soudé aux extrémités d'un fil de cuivre de 600

pieds de long deux plaques de cuivre bien polies, de 4 pieds de surface, il les plongea dans l'eau, l'une au nord et l'autre au sud; le fil qui reposait sur le gazon fut coupé en deux, et ses deux bouts mis en communication avec le multiplicateur au moyen de coupes remplies de mercure. En évitant toutes les causes étrangères qui pourraient donner naissance à un courant, l'aiguille n'éprouva aucune déviation.

M. Faraday a observé que, bien que l'électricité obtenue par l'induction magnéto-électrique dans un fil de métal d'une petite longueur ait peu d'intensité, le courant avait cependant assez de force pour traverser l'eau salée. Mais comme l'intensité augmente avec la longueur du fil, il chercha à obtenir des effets sensibles avec une grande masse d'eau en mouvement, quoique l'eau tranquille n'en donnât aucun; à cet effet, il fit passer sur le parapet d'un pont un fil de cuivre de 960 pieds, aux extrémités duquel étaient attachés deux autres fils, soudés à de grandes plaques de métal, qui plongeaient dans la rivière. Il obtint constamment des déviations; mais leurs irrégularités lui annoncèrent qu'elles devaient dépendre d'autres causes que celles qu'il avait en vue : les résultats ne furent nullement satisfaisants. Néanmoins, comme les expériences ont été faites sur une petite échelle, que l'eau produit des courants par les aimants, et qu'il est probable que la terre produit aussi dans son sein des courants par suite de sa rotation diurne; de plus, si l'on considère que les masses mobiles de liquide, s'étendant à des distances considérables, doivent traverser les courbes magnétiques et les couper dans différentes directions, il peut très-bien se faire, en raison de tous ces motifs, que l'électricité possède une grande intensité.

287. M. Faraday a avancé, en outre, mais avec une extrême réserve, qu'il pourrait se faire que l'aurore boréale fût due à une décharge de l'électricité poussée vers les pôles de la terre, d'où elle s'efforcerait, par des moyens naturels et particuliers, de retourner aux régions équatoriales, en passant par-dessus la terre.

288. Pour déterminer d'une manière positive la puissance inductive de chaque métal, M. Faraday a fait plusieurs expériences dans lesquelles il passait entre les pôles de l'aimant plusieurs métaux isolés, l'un sur l'autre, et dont les bouts étaient en communication avec le multiplicateur, de manière cependant que les courants cheminassent en sens inverse. Les déviations de l'aiguille aimantée furent très-faibles, bien qu'on eût opéré avec des fils ayant des longueurs considérables.

Pour avoir des résultats satisfaisants, il a employé le multiplicateur à deux fils ou un multiplicateur composé de deux parties indépendantes, et formées chacune de 18 pieds de fil de cuivre couvert de soie. Ces deux moitiés étaient semblables en figure et en nombre de tours, et étaient séparées l'une de l'autre par un petit intervalle où se trouvait une double aiguille suspendue à un fil de soie. Quand les deux courants introduits avaient la même direction, ils agissaient par leur somme, et par leur différence quand ils cheminaient en sens contraire.

M. Faraday ayant formé deux hélices, l'une avec un fil de fer et l'autre avec un fil de cuivre, il les mit en communication avec les deux multiplicateurs, réunis de manière que les courants produits par l'influence des aimants cheminassent en sens inverse. Il trouva que le courant excité dans le fil de cuivre était plus puissant que celui qui était produit, par le même aimant, dans un fil de fer.

En comparant le cuivre avec l'étain et le plomb, le premier surpassa les deux autres ; le deuxième produisit plus d'effet que les autres métaux ; le fer fut plus puissant que l'étain et le plomb ; et ce dernier inférieur à l'étain. Ainsi donc les métaux peuvent être rangés dans l'ordre suivant : cuivre, zinc, fer, étain et plomb. C'est à peu près l'ordre de conductibilité électrique, et celui que MM. Babbage, Herschell et Harris ont trouvé dans leurs expériences de rotation magnétique.

Les faits observés par M. Faraday tendent à prouver que les courants produits dans les corps par l'induction

magnéto-électrique sont proportionnels à leur faculté conductrice, ainsi que les effets magnétiques de rotation, et qu'il y a très-peu de corps qui soient magnétiques comme le fer. Il range les substances en trois classes, relativement à leurs rapports avec les aimants: dans la première, se trouvent celles qui sont affectées quand elles sont en repos, telles que le fer, le nickel et le cobalt; dans la seconde, les substances conductrices de l'électricité qui sont affectées pendant qu'elles sont en mouvement; dans la troisième se trouvent les substances qui sont parfaitement indifférentes à l'aimant, soit qu'elles se trouvent en repos ou en mouvement.

289. En résumant les nombreuses observations qui ont été faites jusqu'ici sur l'induction électro-magnétique, on voit que si un fil métallique, d'une longueur limitée, est mis en mouvement de manière qu'il coupe une courbe magnétique, il se développe pendant cette action une puissance qui tend à faire traverser le fil par un courant électrique; mais un tel courant ne peut pas naître sans qu'il existe de l'électricité aux extrémités du fil, pour la décharge et le renouvellement du courant.

Si un second fil est mis en mouvement dans la même direction que le premier, la même puissance exerce son action sur lui, et il ne peut altérer la condition du premier; mais si ce second fil est mû avec une vitesse différente ou dans une autre direction, il y a alors différence dans la force qui se développe; et si l'on joint les fils à leurs extrémités, ils sont traversés par un courant électrique.

En prenant une masse de métal ou un fil d'une longueur indéfinie, et mobile par rapport aux pôles d'un aimant considéré comme un centre d'action, si toutes les parties de la masse ou du fil sont mues dans une même direction, avec la même vitesse angulaire et à travers des courbes magnétiques d'une intensité constante, on n'obtiendra aucun courant électique.

Si une portion du fil ou du métal coupe les courbes magnétiques tandis que le reste demeure stationnaire,

il y a alors développement de courant. Si le mouvement du métal a lieu dans une même direction, mais avec des vitesses angulaires différentes pour les différentes parties relativement aux pôles de l'aimant, il y a alors formation de courant : c'est ce que montre l'expérience de M. Arago.

Si c'est l'aimant qui est mis en mouvement, il y a encore des courants, mais qui, au lieu de se trouver dans la direction de son mouvement, sont dirigés transversalement à cette direction.

Si différentes parties sont mises en mouvement avec des vitesses égales, mais dans des directions opposées, à travers les courbes magnétiques, on obtient alors le maximum de l'effet.

§ VIII. *Considérations sur la nature des courants induits.*

290. Il existe une analogie frappante entre les courants produits par l'influence d'un aimant dans les hélices et les courants hydro-électriques, et une différence marquée entre ces courants et ceux qui sont d'origine calorifique. Les deux premiers ne sont pas interrompus, quoiqu'ils diminuent de force, quand une portion de liquide se trouve placée dans le circuit, tandis que les courants thermo-électriques sont arrêtés. Un multiplicateur à mille tours d'un fil très-fin est sensible aux deux premiers courants, et ne l'est pas au dernier ; tandis qu'un multiplicateur à fil court et à gros diamètre est fortement affecté par le courant thermo-électrique, et l'est peu par les deux autres courants.

On attribue généralement cette différence à ce que la tension est plus grande dans les piles ou couples hydro-électriques que dans les piles ou couples thermo-électriques. Il faut donc qu'il y ait aussi une assez forte tension dans l'électricité d'où émanent les courants produits par l'influence d'un aimant.

M. Peltier a imaginé une expérience intéressante, qui

est propre à montrer les effets magnétiques des courants par induction, suivant que ces courants proviennent de la réunion de plusieurs courants égaux ou de courants qui s'influencent réciproquement en se superposant l'un l'autre. Il forme cinq hélices superposées, en enroulant successivement sur un tube de verre un fil de cuivre recouvert de soie; puis sur celui-ci un second fil semblable; ainsi de suite. Les extrémités de ces cinq hélices étant libres, on peut faire usage à volonté de telle ou telle hélice, ou bien réunir par les mêmes extrémités autant d'hélices qu'on veut, ou bien encore ne former qu'une seule hélice en réunissant l'extrémité de la première avec le commencement de la seconde, et l'extrémité de celle-ci avec le commencement de la troisième; ainsi de suite.

Pour que l'on puisse mieux comprendre les résultats auxquels M. Peltier est parvenu, nous allons employer les mêmes annotations que lui.

Numéros des hélices.	Designation de l'entrée.	Désignation de la sortie.
1re hélice......	A...........	A'
2e hélice......	B...........	B'
3e hélice......	C...........	C'
4e hélice......	D...........	D'
5e hélice......	E...........	E'

Dans chacune des expériences, il a toujours plongé dans l'hélice le même barreau aimanté.

En opérant avec la 1re hélice, dont les bouts étaient en communication avec un multiplicateur d'un seul tour, la déviation a été de 5 degrés; avec un multiplicateur d'un gros fil formant 10 tours, elle a été de 30 degrés; avec un fil de 2000 tours, de 35 degrés seulement.

En recueillant l'électricité dégagée, quand on réunit le bout B avec le bout A, et B' avec A', le multiplicateur à 1 tour a donné 10 degrés, celui à 10 tours 35, celui à 2000 tours 35.

Ayant réuni successivement de la même manière,

bout à bout, 3, 4, puis 5 hélices, il a obtenu les résultats consignés dans le tableau qui suit.

NOMBRE des hélices réunies par les mêmes extrémités.	ACTION sur un multiplicateur formé d'un seul tour.		ACTION d'un multiplicateur de 10 tours.		ACTION sur un multiplicat. de 2000 tours.	
	Fil conducteur de 0 m. 8.	Fil conducteur de 1 mill. 4	Conducteur de 0 mill. 8.	Conducteur de 1 mill. 4.	Conducteur de 0 mill. 8.	Conducteur de 1 m. 4.
1re hélice.	5°	5°	30°	50	35°	*idem*.
2	10	10 1/2	35	90	35	»
3	14	15	44	l'aig. pirouette.	35	»
4	17	18 1/2	55	plus fort	35	»
5	20	22	60	plus fort encore.	36	»

La réunion des 5 hélices a donc donné une déviation quatre fois plus forte que celle que l'on avait obtenue avec un multiplicateur à 1 tour; elle a été double avec celui de 10 tours, et n'a produit aucun changement sur celui formé avec un fil de 2000 tours. La différence des conducteurs a plus que doublé l'effet sur le multiplicateur de 10 tours; elle a fait peu sur celui d'un seul et n'a rien produit sur celui de 2000 : donc le gros fil a laissé s'écouler plus facilement l'électricité induite.

En réunissant toutes les hélices, de manière à ne former qu'un seul circuit, M. Peltier a obtenu :

NOMBRE d'hélices réunies en piles.	MULTIPLICATEUR d'un tour.	MULTIPLICATEUR de 10 tours.		MULTIPLICATEUR de 200 tours.			
		Conducteur de 0 m. 8.	Conducteur de 1 m. 11.	Conducteur de 0 mill. 8.	Siph. d'eau commune, interposé entre les bouts en cuivre.	Siph. d'eau acidulée, bouts en platine.	Emploi d'un petit barreau rond de 3 mill. de dia.
hélices. 1 ..	.. 5°.	.. 30°..	..45° ..	... 35°...	... 2°....	... 1/2 ...	... 7°
2 ..	.. 5 .	.. 33 ..	.. 45 ..	... 60 ...	... 3 1/2	.... 1 ...	... 11
2 ..	.. 5 .	.. 35 ..	.. 45 ..	... 70 ...	... 5 ...	.... 2 ...	... 15
4 ..	.. 5 .	.. 38 .	.. 45 ..	... 90 ...	... 9 ...	.... 3 ...	... 18
5 ..	.. 5 .	.. 41 ..	.. 45 ..	l'aiguille pirouette.	... 12 ...	.... 4 ...	... 22

Ce mode de multiplication n'a produit aucun effet sur le multiplicateur à 1 seul tour, ainsi que sur celui à 10 tours, quand le fil a un petit diamètre; mais il y en a un très-marqué lorsque ce fil a un diamètre d'une certaine grosseur. On ne peut guère attribuer cet effet qu'à la résistance vaincue du premier conducteur. Ce mode de multiplication a triplé l'effet du multiplicateur de 2000 tours; il a sextuplé la déviation, lorsqu'on a interposé un siphon d'eau entre les deux bouts en cuivre, etc.

M. Peltier a observé que l'effet augmentait d'autant plus que l'obstacle était plus grand. Or, rendons-nous compte de ce qui se passe dans cette expérience. L'électricité produite par induction dans l'hélice A A′ passe dans l'hélice BB′, qui est soumise également à l'induction, pendant qu'elle est traversée par le courant de A A′; ainsi de suite pour les autres hélices. On ne peut dire que c'est une action nouvelle qui s'ajoute à une autre, puisque le multiplicateur à un seul tour n'accuse pas plus d'effet dans un cas que dans l'autre; c'est donc un accroissement de force qui se produit, puisque

la résistance des longs conducteurs ou des corps mauvais conducteurs est plus facilement vaincue.

Quoique le courant produit avec une seule hélice, ou dans les cinq hélices réunies bouts à bouts, agisse de la même manière sur un multiplicateur à un tour, les résultats consignés dans le dernier tableau montrent que le courant dans le second cas n'est pas le même que dans le premier, puisqu'il devient apte à franchir de plus grandes distances que l'autre. Il paraît donc, d'après cela, que le courant développé dans la première hélice, en passant dans la seconde, éprouve une modification de la part de celui qui y est produit; ce courant ainsi modifié, en traversant la troisième, reçoit encore une nouvelle modification, etc.

M. Peltier a prouvé que l'on était conduit aux mêmes conséquences en remplaçant l'aimant par une double hélice, dans laquelle on fait passer un courant voltaïque, soit dans les deux hélices, en réunissant les deux bouts A et B, soit en opérant la jonction de A avec B'.

291. Dans les phénomènes thermo-électriques, on retrouve des effets semblables à ceux qui ont été observés par M. Peltier, et qui ont l'avantage d'être mesurés de manière à pouvoir déterminer leurs rapports réciproques.

Prenons un fil composé de fils alternatifs cuivre, fer, cuivre, fer, etc., soudés bout à bout, et dont les deux bouts extrêmes cuivre et fer sont en communication avec un multiplicateur.

Maintenant si l'on élève la température d'une des soudures, tandis que celles des autres sont maintenues à zéro, l'aiguille aimantée est déviée d'un certain nombre de degrés, et l'on peut, au moyen des tables que nous avons données, connaître la force électro-dynamique qui correspond à cette déviation.

Au lieu de se borner à élever la température d'une soudure à 10°, par exemple, chauffons au même degré, non pas la soudure qui vient ensuite, mais celle qui suit celle-ci, pour avoir un courant dirigé dans le même

sens. Le courant qui se développe à l'une des soudures va ajouter son action à celle de l'autre; si donc nous considérons les courants électriques comme le résultat d'un mouvement oscillatoire particulier, la vitesse des oscillations devra être augmentée. L'expérience prouve que la force électro-dynamique, qui est produite dans le second cas, est précisément double de celle qui avait lieu avant. En chauffant trois, quatre, cinq soudures alternatives, l'intensité du courant devient sensiblement double, triple, etc. S'il ne s'était produit dans les mêmes circonstances que des quantités égales d'électricité, on aurait toujours eu la même déviation; c'est précisément ce qui arrive quand on augmente les dimensions des couples thermo-électriques. L'intensité du courant, dans ce cas, ne dépend nullement de la quantité d'électricité dégagée, car la déviation reste la même, quelle que soit l'étendue des couples, mais bien de l'état de l'électricité quand elle se dégage. C'est de cet état dont nous nous occuperons dans le troisième volume.

Lorsqu'on fait passer, dans un circuit métallique *ab*, un courant électrique, ne peut-on pas supposer, comme nous l'avons déja dit, que ce courant agisse par influence sur la matière électrique d'un circuit *a′b′* placé à peu de distance, de manière à chasser, dans les parties les plus éloignées, une des deux électricités en la polarisant, d'où résulte un courant dirigé en sens contraire de celui du courant inducteur, et à attirer, dans la partie la plus rapprochée du circuit, après l'avoir également polarisée, l'autre électricité, dont l'action se trouve par là dissimulée?

Vient-on à suspendre l'action du courant inducteur, les particules électriques qui se trouvaient en repos se mettent aussitôt en mouvement, et produisent un courant dirigé dans le même sens. Cette manière de voir tendrait à admettre que tout courant électrique est formé de la réunion de deux courants, l'un d'électricité positive et l'autre d'électricité négative. Nous examinerons plus tard cette question.

Ces particules électriques polarisées qui sont en repos doivent communiquer au circuit $a'b'$ une propriété quelconque. Ne constitueraient-elles pas par hasard le magnétisme qui se développe dans tous les corps placés entre les pôles opposés de deux forts barreaux librement suspendus, car on ne peut réellement attribuer cette propriété à de très-petites quantités de fer? Ces aiguilles, quand elles sont librement suspendues, obéiraient à l'action des aimants, par suite de l'action de ces derniers sur les particules électriques polarisées qui sont en repos.

On peut nous objecter que les corps les plus mauvais conducteurs de l'électricité, tels que le bois, le verre, la gomme laque, etc., se comportent entre les aimants comme les métaux. A cela nous répondrons qu'il doit se produire également des courants, mais qui ne peuvent être accusés par le multiplicateur; la raison en est toute simple : lorsque les deux principes électriques sont séparés en un point quelconque d'un corps, une partie se recombine sur ce point et l'autre, en suivant tous les conducteurs qui se présentent à eux; mais si le corps est un mauvais conducteur, la recomposition s'effectue au point même; cependant si l'une des électricités est attirée par une cause quelconque, et l'autre repoussée, celle-ci n'a plus la vitesse suffisante pour constituer un courant, et elle s'écoule lentement sans réagir sur le multiplicateur.

Au surplus, on sait que tous les corps renferment du fluide neutre, que ce fluide soit de l'éther ou toute autre matière subtile, peu importe, et que lorsqu'on le place sous l'influence d'un corps électrisé, il est décomposé, l'électricité de nom contraire est attirée et l'autre est repoussée; pareil phénomène doit se reproduire, mais avec des modifications, quand un corps conducteur est placé sous l'influence d'un fil de métal parcouru par un courant électrique. En effet, supposons, pour fixer les idées, qu'une particule d'électricité positive soit placée sur un corps, elle attirera à elle une particule d'électricité négative du corps voisin, et si

celle-ci ne peut franchir la distance qui la sépare de l'autre, son action sera dissimulée. Cette même particule d'électricité positive venant à être soumise à un mouvement rapide, sera remplacée par une autre, qui agira de la même manière sur la particule d'électricité négative, sans permettre cependant à celle-ci de se déplacer. Si le fait peut avoir lieu pour deux particules, il aura lieu aussi pour un plus grand nombre, et on en conclura alors qu'à l'instant où un courant agit sur un conducteur, par induction, il déplace son fluide neutre en produisant deux courants, l'un dirigé dans le même sens, qui est attiré de manière à ce que son action est nulle sur le multiplicateur, et l'autre qui, étant dirigé dans un sens contraire, est repoussé et peut être accusé par le multiplicateur.

CHAPITRE SUPPLÉMENTAIRE.

§ 1er. *Sur les propriétés électriques de la tourmaline.*

292. L'IMPRESSION de ce volume était très-avancée quand parut un travail de M. Forbes sur la tourmaline (1); je remis à en parler dans un chapitre supplémentaire.

M. Forbes, pour étudier les propriétés électriques que la tourmaline acquiert par la chaleur, a employé l'électroscope de Coulomb (fig. 127), auquel il a fait quelques additions. La pierre d'essai est introduite à travers la tubulure C, et l'on communique au disque de clinquant une électricité contraire à celle que manifeste l'extrémité de la pierre en regard, pendant le refroidissement. Les répulsions du disque, et par suite les intensités électriques, sont mesurées au moyen des divisions d'un cercle IK. Il prend un fort cristal de tourmaline qu'il chauffe à une haute température, et le soumet immédiatement à l'action du disque : ce cristal ne montre d'abord aucune action; mais peu après, le pouvoir répulsif se développe graduellement, le disque recule peu à peu, et atteint son maximum d'écartement quand le refroidissement a été suffisant; l'aiguille reste alors stationnaire pendant un certain temps; puis la répulsion diminue, et le disque approche de sa position primitive d'équilibre. M. Forbes a reconnu, comme je l'avais déja

(1) Trans. of the royal Society of Edinbourg, vol. XIII.

démontré, que le maximum d'intensité électrique n'a pas lieu lorsque le refroidissement est le plus rapide, et qu'il n'y a aucune émission d'électricité lorsque la température n'éprouve plus aucun changement.

Voulant comparer les intensités électriques de différents cristaux, M. Forbes a pris pour mesure du pouvoir électrique le maximum de déviation, qu'il regarde comme indépendant de la température exacte de la pierre et du temps. Le disque de clinquant perdant à chaque instant, par son contact dans l'air, une portion de son électricité, devait nécessairement introduire des erreurs dans l'appréciation exacte de ce maximum. Il ne s'est pas dissimulé cette difficulté; pour l'éviter, du moins en partie, il a opéré dans des circonstances favorables, et n'a commencé seulement ses séries d'expériences que peu de temps après que le disque avait reçu son électricité, afin que la perte fût la moindre possible. Il a répété en outre chacune de ces séries dans un ordre inverse, afin d'obtenir pour la même pierre deux observations également éloignées de l'état moyen de la tension électrique de la tourmaline; la moyenne est la valeur cherchée. Les déviations du disque peuvent servir, à la vérité, à comparer les diverses charges électriques de la tourmaline; mais ces charges ne peuvent être mesurées exactement qu'autant qu'on les rapporte à une déviation constante, en tordant convenablement le fil de torsion; ce que n'a pas fait M. Forbes.

Ce physicien a d'abord appliqué sa méthode à la détermination des relations qui peuvent exister entre la forme et les dimensions des cristaux de tourmaline et leur pouvoir électrique, question qui m'a occupé il y a quelques années, et dont j'ai rendu compte de la manière suivante dans ce volume, page 67:

« Une tourmaline non électrique par la chaleur ayant « été partagée en deux, les deux fragments le sont de- « venus. Ces faits tendent à prouver que les phénomè- « nes électriques de la tourmaline varient en raison de « la longueur et de la grosseur, et peut-être de la dia-

« phanéité des cristaux, puisque les plus petites tour-
« malines prennent une polarité très-forte par de faibles
« changements de température, et que celles qui ont
« de 5 à 6 centimètres de long perdent déja la propriété
« de s'électriser par le premier mode, et qu'enfin de
« grandes tourmalines paraissent être réfractaires. »

La tourmaline que j'ai soumise à l'expérience avait 3,2 pouces anglais de long, et environ 3,08 de pouces de diamètre, et celles sur lesquelles M. Forbes a expérimenté avaient à peu près la même longueur, mais un diamètre un peu différent; au lieu de la trouver réfractaire comme la mienne l'était par l'élévation et l'abaissement de température, il y a reconnu au contraire une faculté électrique très-prononcée.

M. Forbes ne tient pas compte de la température à laquelle se montre l'électricité, parce qu'il en regarde la détermination comme très-incertaine, cette température n'étant pas la même à l'intérieur qu'à l'extérieur. Je répondrai à cette assertion, que lorsque l'on opère avec des tourmalines pour ainsi dire capillaires, on n'a pas à craindre autant cet inconvénient. Au surplus, je pense que l'erreur qui provient de la perte dans l'air de l'électricité du disque de clinquant, est une cause d'erreur beaucoup plus grande que celle-ci.

293. M. Forbes a fait quatre séries d'expériences, deux dans l'ordre direct et deux dans l'ordre inverse, avec six tourmalines de 1,3 ~~pouce de long~~, et dont les épaisseurs ou les aires de section étaient comme les nombres 14.11.7.6. et 4; il n'a trouvé aucun rapport direct avec les aires, car les intensités étaient représentées par 1.2.5.4.3. D'autres séries, faites avec une suite de cristaux de 1,2 et 1,8 pouce de long, ont donné également des indications irrégulières.

Néanmoins il avance que la dimension de la section a ordinairement une influence telle, que là où les différences sont considérables, le cristal le plus gros a presque toujours le plus grand pouvoir.

Un cristal de 1 pouce $\frac{1}{4}$ de long avait son maximum

d'intensité à 45° de déviation. L'ayant brisé aussitôt à un quart de sa longueur, les deux portions furent chauffées et soumises de nouveau à l'expérience : la moyenne de la plus grande portion a donné une déviation égale à 47°, et celle de la plus petite une déviation égale à 43° : la moyenne de ces deux nombres est précisément la force de la tourmaline entière. Les déviations n'ayant pas été rapportées à une mesure commune, on ne peut en tirer rigoureusement cette conséquence. M. Forbes en a conclu néanmoins que la diminution ne paraît pas être favorable au développement de l'électricité, conséquence qui est encore en contradiction avec celle que j'ai tirée de mes expériences. Pour bien s'assurer de l'influence des longueurs, il a réuni plusieurs tourmalines d'un diamètre de $\frac{1}{10}$ de pouce, et dont les sections étaient aussi égales que possible ; il a obtenu les résultats suivants :

Numéros.	Longueur.	Intensité.
1	3,25 pouces......	79°,5
2	2,10	82
3	1,60	60
4	1,55	60
5	1,35	89
6	1,19	68

Ces nombres nous montrent bien que le cristal le plus long tient un rang élevé parmi ceux d'égale section, et qu'il ne paraît pas exister de rapport entre la longueur et l'intensité. On voit que pour étudier les changements qui s'opèrent dans les propriétés électriques de la tourmaline, en faisant varier la longueur, il a formé une pile en plaçant les unes sur les autres des plaques de tourmaline.

Mais j'avoue que je ne conçois pas comment cet arrangement pourrait donner des indications satisfaisantes, car les propriétés électriques de la tourmaline sont tellement variables, en raison de la forme, de la couleur

et d'autres causes que nous signalerons plus loin, qu'elles doivent présenter encore de bien plus grandes anomalies quand on applique, les unes sur les autres, des plaques de tourmaline qui laissent entre elles des interstices qui s'opposent naturellement au développement et à la répartition de l'électricité.

294. M. Forbes avance que l'arrangement artificiel qui représente le mieux les phénomènes de tourmaline, est celui d'une série de plaques de verre isolées, placées parallèlement les unes au-dessus des autres, et dont les deux surfaces sont revêtues d'une feuille d'étain; la surface inférieure communiquant avec la surface supérieure de la plaque contiguë au moyen d'une tige métallique, etc. Si une des extrémités de cette batterie est mise en communication avec une source électrique, et que l'autre communique avec la terre, les plaques, à une de leurs extrémités, manifestent l'excès d'électricité qu'on leur a communiqué, tandis que celles de l'autre côté possèdent une espèce d'électricité de nature contraire, et le milieu ne manifeste aucune trace d'électricité libre. Si l'on diminue la longueur de la pile, il n'y a aucun changement dans l'intensité de l'électricité, mais cette intensité a un rapport direct avec la surface des plaques. M. Forbes part de là pour dire que l'analogie porte à croire que l'intensité augmente avec le diamètre de la tourmaline, mais que l'on ignore si la longueur du cristal, quand sa structure est parfaitement uniforme, a ou non de l'influence sur les propriétés.

L'inégalité de température, dans quelques parties de la pierre, s'oppose à ce que toutes les portions donnent en même temps un maximum d'intensité. M. Forbes a trouvé un cristal de tourmaline dont la structure paraissait régulière à la vue, et qui jouit de la singulière propriété de présenter, en se refroidissant, un pôle d'électricité positive à chaque extrémité. Au moyen du plan d'épreuve de Coulomb, il a trouvé que la portion centrale du cristal possédait un excès d'électricité résineuse.

Haüy a observé un cas semblable dans un cristal de topaze. Le docteur Brewster a expliqué ce fait, en disant que le cristal de topaze était composé de deux autres cristaux dont les pôles positifs se trouvaient en contact.

Pour vérifier cette conjecture, il aurait fallu couper avec soin la pierre suivant la face de jonction, et voir si réellemeut, après la séparation, les deux faces en regard possédaient la même électricité.

295. M. Forbes a soumis au même mode d'expérimentation que la tourmaline d'autres minéraux qui jouissent de la pyro-électricité; il a passé successivement en revue la topaze, la boracite et la mésotype. Il a trouvé, conformément à la loi que j'avais observée, que l'intensité de l'électricité atteint son maximum quand la vitesse du refroidissement est devenue comparativement plus basse.

La topaze possède la propriété de conserver son électricité long-temps après que la température a cessé d'éprouver des changements; mais cela dépend uniquement de la conductibilité de la pierre, car l'on conçoit que celle-ci, devenant moins conductrice de l'électricité à mesure que la chaleur diminue, la recomposition des deux électricités doit mettre plus de temps à s'effectuer.

M. Forbes a conclu de ces expériences que dans tous les minéraux la difficulté de décomposition et de recomposition augmente avec la masse; de là vient que les plus petits cristaux sont plus facilement excités, et que les effets sont plus permanents.

Il a trouvé, par exemple, qu'un large cristal de boracite, qui avait un tiers de pouce de côté, présentait des résultats analogues quand on présentait à l'électroscope un de ses quatre pôles résineux; le disque s'éloignait lentement et d'une manière régulière à mesure que le refroidissement s'opérait, et au bout de dix minutes, il atteignait son maximum de durée. La diminution d'électricité était ensuite très-lente; en 3 quarts d'heure le disque ne s'était que très-peu approché de sa première

position. Un petit cristal de boracite, traité de la même manière, atteignait rapidement le maximum, et l'aiguille, dans une des expériences, retourna à zéro au bout de 20 minutes ; dans une autre, au bout d'une demi-heure. Les cristaux aciculaires de mésotype atteignaient avec facilité un haut degré d'excitation électrique, de sorte qu'il fallait une grande attention pour découvrir si le maximum d'intensité n'avait pas lieu immédiatement.

296. M. Forbes, dans ses recherches, n'a pas tenu compte de la conductibilité électrique des cristaux. C'est là où l'on peut trouver la solution de la plupart des difficultés que présentent les phénomènes de la tourmaline. En effet, tout porte à croire que, lorsque les molécules des corps éprouvent un déplacement quelconque par la chaleur, le choc ou toute autre action mécanique, le principe électrique est mis en mouvement, c'est-à-dire que les deux fluides appartenant à deux molécules en regard sont séparés immédiatement, et se recombinent ensemble plus ou moins rapidement, suivant la conductibilité du corps, pour former du fluide neutre. Si ce corps est très-bon conducteur, la combinaison est instantanée, et il est impossible de recueillir aucune trace d'électricité libre. Aussi n'existe-t-il aucun corps bon conducteur de l'électricité qui soit électrique par la chaleur, à la manière des tourmalines. Mais il n'en est plus de même quand il est mauvais conducteur et que sa structure cristalline l'assimile aux piles électriques. Or, on sait par les analyses qui ont été faites d'un grand nombre de tourmalines, qu'elles ne renferment pas toutes la même quantité d'oxide de fer ; dès lors leur propriété électrique doit varier en raison de cette quantité, puisque la conductibilité électrique doit varier aussi. Nous voyons, par exemple, que dans les tourmalines noires de Rabenstein (1) l'analyse a donné près de 20 parties pour 100 d'oxide de fer et de manganèse, tandis que des tourmalines noi-

(1) Traité de Minéralogie de Beudant, vol. II, p. 159.

res du Saint-Gothard n'en ont fourni que 9. Il est infiniment probable que si nous avions pu comparer les propriétés électriques des tourmalines de ces deux localités, nous n'aurions pas obtenu, à beaucoup près, les mêmes nombres pour leurs intensités électriques.

Il peut très-bien se faire que la tourmaline dans laquelle je n'ai pas reconnu la propriété électrique par la chaleur, se trouvât dans le cas des substances suffisamment conductrices pour qu'elle ne pût conserver l'électricité dégagée par l'élévation de température. Nous ajouterons cependant qu'il est de fait qu'une tourmaline qui n'était pas électrique dans son entier, l'est devenue après qu'on l'eut brisée en deux. Au surplus, on peut voir (p. 65) que je ne me suis pas dissimulé les difficultés que l'on éprouve à déterminer toutes les lois relatives au dégagement de l'électricité dans la tourmaline, puisque j'ai avancé « que l'intensité des effets observés varie tellement dans les cristaux provenant de la même localité, que l'on est porté à attribuer ces variations à des différences dans leur dimension, leur structure ou leur couleur. »

J'ajouterai, en terminant, que les physiciens qui s'occuperont dorénavant de cette question devront tenir compte, dans leurs expériences, de la conductibilité électrique, qui doit jouer un grand rôle, et employer le procédé indiqué par M. Forbes, avec beaucoup de circonspection, attendu que la perte continuelle d'électricité qui a lieu sur le disque de clinquant par le contact de l'air et l'action du second pôle dans les cristaux courts, peuvent occasioner des erreurs qui jettent un grand trouble dans les résultats. Les expériences sur la boracite exigent aussi de grandes précautions, attendu que les pôles de noms contraires étant très-rapprochés, il doit en résulter des effets compliqués, qui permettent difficilement d'apercevoir des lois générales. C'est là le motif qui m'avait empêché d'expérimenter sur cette substance.

§ II. *Appareil destiné à remplacer dans l'électroscope les deux piles sèches.*

297. M. Peltier, auquel nous devons d'ingénieuses expériences sur l'électricité, a eu l'idée de substituer aux deux piles sèches, dans l'électroscope de Bobenberger, deux tiges de laiton, placées à quelques lignes de distance des deux feuilles d'or de l'électroscope de Volta. Aussitôt que ces deux feuilles ont reçu un excès d'électricité quelconque, qui n'est pas suffisant pour les faire écarter sensiblement, si elles étaient seules, l'action qu'elles exercent par influence sur les tiges concourent à augmenter l'écartement et à rendre par conséquent plus appréciable l'électricité communiquée.

FIN DU DEUXIÈME VOLUME.

TABLE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS CE VOLUME.

PREMIÈRE PARTIE.

DE L'ÉLECTRICITÉ ET DU MAGNÉTISME.

LIVRE PREMIER.

DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE SON DÉGAGEMENT.

Pages.

§ I. Considérations générales sur le dégagement de l'électricité et sur quelques-unes de ses principales propriétés. 1
§ II. Du pouvoir conducteur des corps................. 3

CHAPITRE II.

DES APPAREILS A L'AIDE DESQUELS ON RECONNAIT LA PRÉSENCE DE L'ÉLECTRICITÉ QUAND ELLE EST EN REPOS OU EN MOUVEMENT.

§ I. Des électroscopes et des électromètres............. 7
§ II. Des multiplicateurs électriques.................. 15
Multiplicateur à fil long.......................... 17
Multiplicateur thermo-électrique, ou à fil court...... 18
§ III. De la mesure des courants électriques............ 20
Méthode des différences.......................... 28

CHAPITRE III.

DU DÉGAGEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ.

§ I. De l'influence de la chaleur sur le dégagement de

Pages.
l'électricité, et de la production des courants thermo-électriques.................................... 34
§ II. Des effets thermo-électriques produits dans les circuits formés de deux métaux différents.................. 44
§ III. Du dégagement de l'électricité par la chaleur dans diverses substances minérales cristallisées............ 59
§ IV. Des effets de la chaleur sur les corps mauvais conducteurs.. 70
§ V. Du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques; principe général......................... 74
§ VI. Effets électriques produits dans la réaction des dissolutions les unes sur les autres.................... 77
§ VII. Des effets électriques produits dans la réaction des métaux sur les acides ou les dissolutions salines...... 81
§ VIII. Effets électriques produits dans la réaction de deux métaux différents sur un ou plusieurs liquides......... 83
§ IX. Effets électriques produits dans la combustion...... 85
§ X. Des effets électriques produits dans les décompositions chimiques...................................... 87
§ XI. Des effets électriques produits dans la décomposition de l'eau oxigénée par divers corps.................. 91
Des métaux qui décomposent le peroxide d'hydrogène sans s'altérer................................ *ibid.*
Des métaux qui décomposent le peroxide d'hydrogène, en absorbant une partie de son oxigène et dégageant l'autre....................................... 92
Action des oxides en général sur l'eau oxigénée....... 93
§ XII. Effets électriques produits dans les actions capillaires.. 94
§ XIII. Du dégagement de l'électricité par pression...... 97
Loi du dégagement de l'électricité par pression....... 100
Usage de l'appareil.............................. 105
§ XIV. Effets électriques de clivage.................. 111
§ XV. Dégagement de l'électricité par frottement........ 113
§ XVI. Effets électriques produits dans le frottement des corps mauvais conducteurs......................... 121
§ XVII. Des effets électriques de frottement considérés comme effets électro-chimiques...................... 130
§ XVIII. Des effets électriques produits dans le contact des corps conducteurs.............................. 133
§ XIX. De l'électricité de tension dans les actions chimiques.. 145
§ XX. Du dégagement de l'électricité par l'influence des courants électriques.............................. 147
§ XXI. Du dégagement de l'électricité par l'action des aimants.. 148

CHAPITRE IV.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Pages.

§ I. Des lois suivant lesquelles agissent les attractions et répulsions électriques.... 152
§ II. De la quantité d'électricité qu'un corps isolé perd dans un temps donné par le contact de l'air plus ou moins humide, et le long de supports plus ou moins *isolants*..... 157
§ III. Distribution de l'électricité sur la surface des corps conducteurs isolés.... 167
§ IV. De l'action par influence, exercée à distance par un corps électrisé sur un corps à l'état naturel.... 177
§ V. Application de l'analyse mathématique à la distribution de l'électricité sur la surface des corps.... 182
§ VI. Du pouvoir des pointes.... 190
§ VII. Des mouvements excités dans tous les corps par les attractions et répulsions électriques.... 192

CHAPITRE V.

DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

§ I. Des machines électriques ordinaires.... 196
§ II. Théorie de la machine électrique.... 201
§ III. Des machines électro-magnétiques.... 205
§ IV. De l'étincelle électrique.... 207

CHAPITRE VI.

DES ÉLECTRICITÉS DISSIMULÉES.

§ I. Du condensateur.... 217
§ II. De l'électrophore ou porteur d'électricité.... 222
§ III. De la bouteille de Leyde et des batteries électriques. 223
§ IV. De la pile de Volta; théorie du contact.... 228
§ V. De la force de la pile sous le rapport de la tension... 237
§ VI. De l'électricité de tension de la pile considérée sous le rapport électro-chimique.... 241
§ VII. Des piles sèches.... 251

DU MAGNÉTISME.

LIVRE II.

CHAPITRE PREMIER.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES AIMANTS.

Pages.

Des attractions et répulsions magnétiques, et des pôles magnétiques 257

CHAPITRE II.

DE L'ACTION DU GLOBE SUR LES AIGUILLES AIMANTÉES.

§ I. Phénomènes généraux ; des boussoles 264
Boussole de déclinaison 265
§ II. De la détermination de la résultante des forces magnétiques du globe 274
§ III. Détermination du moment de la force directrice d'une aiguille 278
§ IV. Comparaison des moments magnétiques de différentes aiguilles d'acier de même diamètre et de différentes longueurs 282
§ V. Du moment de la force directrice des aiguilles relativement à leur diamètre 283
§ VI. Détermination de l'intensité absolue du magnétisme terrestre 284

CHAPITRE III.

LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES 285

CHAPITRE IV.

SUR LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

§ I. Méthode du contact successif, de celle de Duhamel et d'Æpinus 291
§ II. Méthode de la double touche 293
§ III. Procédé de Coulomb 295
§ IV. Des armures ou armatures 297
§ V. Procédé pour aimanter à saturation des barreaux d'acier par l'action de la terre 300

CHAPITRE V.

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME DANS LES FILS D'ACIER AIMANTÉS.

Pages.

§ I. Distribution du magnétisme libre dans les fils d'acier aimantés à saturation par la méthode de la double touche. 306
Expériences sur un fil d'acier de 27 pouces de longueur et de 2 lignes de diamètre 309
§ II. De la distribution du magnétisme libre dans les fils d'acier d'un très-petit diamètre... 312
§ III. Distribution du magnétisme dans les barreaux d'acier non aimantés, à saturation, et en ayant égard à l'action du magnétisme terrestre........................... 322
§ IV. Des différents degrés de force magnétique que reçoit une aiguille d'acier par l'effet des frictions multiples qui servent à l'aimanter, et des changements qu'y apporte le renversement des pôles........................ 328
§ V. Des aiguilles aimantées, de leurs formes, de leurs dimensions et de leur trempe....................... 334
§ VI. De la force magnétique des aiguilles réunies en faisceaux, ou détachées de ces mêmes faisceaux.......... 337
§ VII. Des aiguilles de boussole..................... 339
§ VIII. Des actions exercées sur l'aiguille aimantée par des sphères de fer................................... 343
§ IX. Recherches de M. Haldat sur la force coercitive des aimants.. 355
§ X. Observations sur la distribution du magnétisme dans les aimants, et sur la force coercitive................ 357

CHAPITRE VI.

DE L'INFLUENCE DE LA CHALEUR SUR LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU FER, DE L'ACIER ET DES AIMANTS.

§ I. Des propriétés magnétiques du fer et de l'acier incandescents.. 361
§ II. De l'influence de la température sur la distribution des aimants.. 365

CHAPITRE VII.

DE L'ACTION DES AIMANTS SUR TOUS LES CORPS EN REPOS.

§ I. De l'action des aimants sur tous les corps en repos.... 382
§ II. Action de tous les corps sur l'aiguille aimantée pour diminuer l'amplitude des oscillations sans changer leur nombre... 393

Pages.

§ III. Des phénomènes magnétiques produits dans tous les corps par la rotation.......................... 396
§ IV. Des effets de la force coercitive dans l'acier sur le magnétisme par rotation.......................... 406
§ V. Des phénomènes magnétiques produits dans une sphère de fer pleine ou creuse, par la rotation.............. 407

CHAPITRE VIII.

THÉORIE MATHÉMATIQUE DU MAGNÉTISME. 412

CHAPITRE IX.

THÉORIE MATHÉMATIQUE DES PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES DE ROTATION.................................... 423

DE L'ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

LIVRE III.

CHAPITRE PREMIER.

DE L'ACTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES CONTINUS OU DISCONTINUS SUR L'AIGUILLE AIMANTÉE, L'ACIER ET LE FER DOUX.

§ I. De l'action des courants électriques sur l'aiguille aimantée.................................... 430
§ II De l'action à distance du courant sur l'aiguille aimantée.................................... 432
§ III. Des hélices.................................... 436
§ IV. Action sur l'aiguille aimantée du multiplicateur avec les décharges d'une bouteille de Leyde.............. 437

CHAPITRE II.

DE L'AIMANTATION DU FER ET DE L'ACIER PAR LES COURANTS ÉLECTRIQUES CONTINUS ET DISCONTINUS.

§ I. Premières observations relatives à l'aimantation par les courants et les décharges électriques............. 443
§ II. De l'aimantation par les décharges électriques...... 445
§ III. De l'aimantation par les courants électriques...... 458
§ IV. De la force magnétique que prennent des barreaux de fer doux, sous l'influence des courants électriques.. 461
§ V. De la conservation de la puissance magnétique dans le fer doux.................................... 465

CHAPITRE III.

DES ACTIONS EXCITÉES DANS TOUS LES CORPS PAR L'INFLUENCE DES COURANTS ÉLECTRIQUES OU DES AIMANTS.

Pages.

§ I. Des actions magnétiques produites dans différents minerais de fer par l'influence des courants électriques.... 468
§ II. Des courants électriques produits par l'influence des courants électriques.............................. 469
§ III. Des courants électriques produits par l'influence des aimants....................................... 471
§ IV. Nouvel état électrique de la matière pendant l'induction.. 474
§ V. Explication des phénomènes magnétiques de M. Arago au moyen de l'induction magnétique................ 476
§ VI. Détermination de tous les courants électriques produits dans les disques en mouvement par les aimants.... 482
§ VII. De l'induction magnéto-électrique terrestre....... 487
§ VIII. Considérations sur la nature des courants induits.. 494

CHAPITRE SUPPLÉMENTAIRE.

§ I. Sur les propriétés électriques de la tourmaline...... 502
§ II. Appareil destiné à remplacer dans l'électroscope les piles sèches.................................... 510

FIN DE LA TABLE.

ERRATA

DU

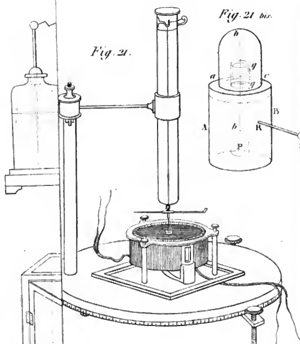
TOME SECOND.

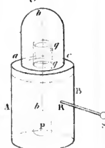
Pages.	Lignes.	
3	2	vascules, *lisez :* vacuoles.
5	19	d'électricités, *lisez :* d'électricité.
5	16	dans un espace donné, *lisez :* dans un espace donné. En outre, cette tension n'est autre que la pression exercée par le fluide électrique sur l'air, laquelle est proportionnelle au carré de la couche électrique.
8	8	contraire, *lisez :* de même nom.
9	31	desséchée, *lisez :* desséché.
12	4	qu'elles, *lisez :* qu'ils.
13	28	en métal, *lisez :* en verre.
15	31	de chacune, *lisez :* de la part de chacune.
17	5	55, *lisez :* SS.
17	26	le pôle opposé, *lisez :* le pôle semblable.
18	20	55, *lisez :* SS.
22	11	bien entendu que, *lisez :* bien entendu.
25	11	voyez pour les détails la figure 3. *Effacez ces mots.*
26	5	$aa = ab$, *lisez :* $aa = bb$.
28	30	$7° + 8'$, *lisez :* $7° + 8°$.
34	26	216, *lisez :* 21 *bis*.
38	10	F, *lisez :* f.
38	10	à droite, *lisez :* à gauche.
43	11	magnétique, *lisez :* électro-magnétique.
43	21	*idem*, lisez : *idem*.
46	26	continuons, *lisez :* 21. Continuons.
48	24	produit, *lisez :* produit dans l'air.
90	15	s'opère, *lisez :* s'est opéré.
95	9	de platine, *lisez :* de platine que l'on fixe également.
134	2	prenait, *lisez :* prit.
142	35	et adhère, *lisez :* et qu'il adhère.
168	4	ne lui donna, *lisez :* ne donna.
169	6	comme on voit. *Supprimez ces trois mots.*
189	29	le rayon est, *lisez :* le rayon soit.
194	27	d'une, *lisez :* de l'une.
199	8	AA', *lisez :* AA' verticalement.
200	21	qu'il est, *lisez :* que le verre.
206	5	un aimant, *lisez :* un aimant AB.
206	9	axe vertical, *lisez :* axe vertical xy.
231	24	de l'un, *lisez :* de l'une.
238	32	des couples, *lisez :* de couples.

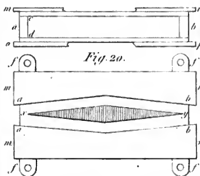
Pages.	Lignes.	
243	21	que les faits, *lisez* : qu'ils.
245	12	sur l'eau de l'acide, *lisez* : de l'eau.
248	15	distribution, *lisez* : distribution analogue.
258	4	magnétique, *lisez* : magnétisme.
260	8	de fil de fer, *lisez* : de ce fil.
294	1	$m'p'$, *lisez* : mp'.
294	2	B et A, *lisez* : B' et A.
295	20	qui a de, *lisez* : qui a.
297	9	du magnétisme, *lisez* : de magnétisme.
307	38	d'une courbe, *lisez* : d'une courbe, fig. 88.
320	24	et toutes, *lisez* : et que toutes.
323	5	1,00 oscillations, *lisez* : 100 oscillations.
327	28	60 cent, *lisez* : 60,3.
328	3	3,0339 et 3,1037, *lisez* : 3,1037 et 3,0339.
339	31	non magnétique, *lisez* : non magnétique, figure 91.
345	8	du boulet, *lisez* : de la bombe.
345	9	celui-ci, *lisez* : celle-ci.
363	26	étai, *lisez* : était.
363	27	maintenu, *lisez* : maintenue.
365	13	des aimants, *lisez* : du magnétisme.
376	7	$x' = \frac{u}{\sqrt{c+F-\frac{(1-q)}{67}F(t-13)}}$, *lisez* : $x' = \frac{n}{\sqrt{\frac{c+F-(1-q)F(t-13)}{67}}}$.
383	26	un tube AB, *lisez* : un tube A'B.
383	28	à volonté, *lisez* : à volonté, mais on y a substitué.
399	13	Herschell, *lisez* : Herschel.
399	29	*idem*, *idem*.
431	17	à connaître, *lisez* : à reconnaître.
436	7	le fil conjonctif, *lisez* : le fil conjonctif, fig. 103 *bis*.
451	5	d'un côté ou de l'autre, *lisez* : non-seulement d'un côté ou de l'autre, mais encore d'un même côté, à une, etc.
451	12	le bas, *lisez* : le pas.
452	20	d'une décharge, *lisez* : d'une décharge double.
459	15	qui étaient plus longues que des, *lisez* : qui dépassaient un peu l'extrémité des petites hélices.
480	7	dout, *lisez* : dont le.
482	3	ont imaginé, *lisez* : ont employé le même procédé que ce physicien.
484	35	DD, *lisez* : DD, fig. 125 *bis*.
486	20	qui est près, *lisez* : qui est plus éloigné.


Fig. 11.


Fig. 10.
v
b


Fig. 21.
2
c
H


Fig. 21 bis.
b
q
a
c
q
A
B
b
R
S
P


m
n
a
c
b
d
o
p
Fig. 20.
f
f
m
n
a
b
x
y
a
b
m
n
f
f

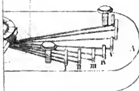
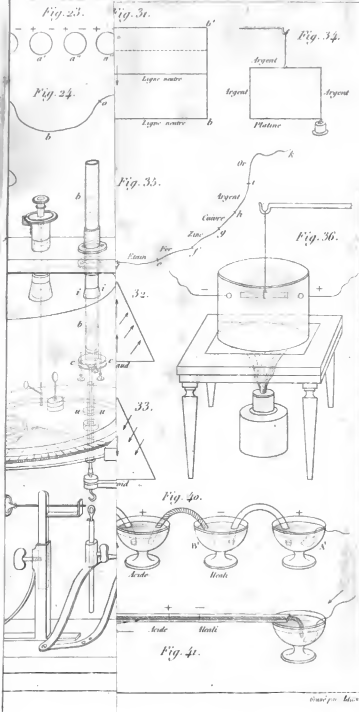

T
H
s
A
T
R
m
n


Fig. 21 bis

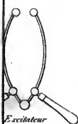




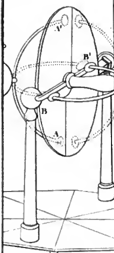
Gravé par Adam

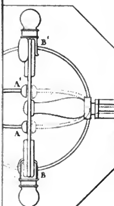

TORIO EMANUELE III° - R
NAPOLI

Fig. 48 bis.



Excitateur





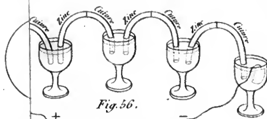


Fig. 56.

Fig. 57.

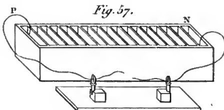


Fig. 51.





Fig. 53 bis.

Fig. 54.

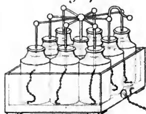


Fig. 52.



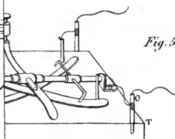
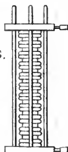
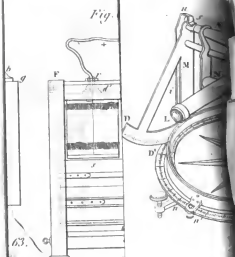


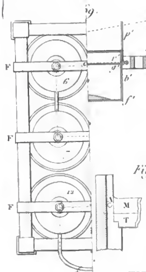
Fig. 55.

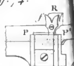


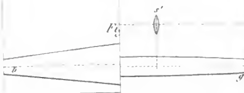
Gravé par Adam



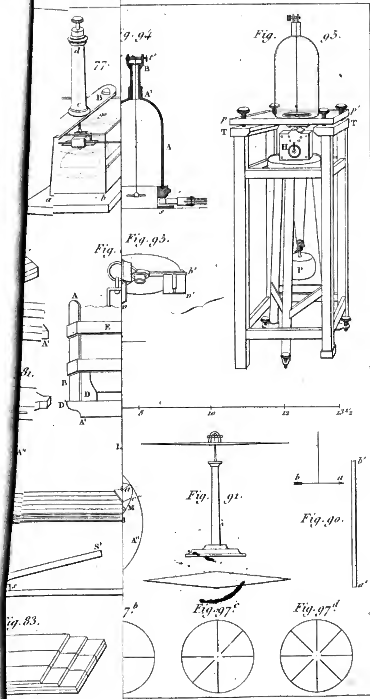

Fig.
63.




Fig. 74.






Fig. 94
Fig. 95.
77.
Fig. 95.
Fig.
81.
Fig. 91.
Fig. 90.
Fig. 97.c
Fig. 97.d
ig. 83.
Gravé par Adam


BIBLIOTECA NAZIONALE

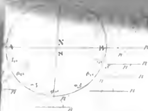
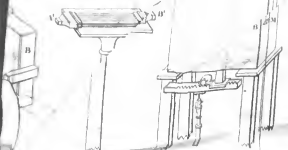


Fig. 102.



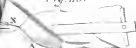


Fig. 118.

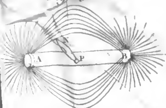


Fig. 119.

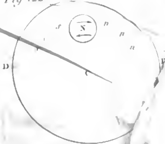


Fig. 122



Fig. 120.

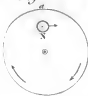


Fig. 121.

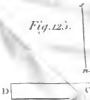


Fig. 123.





